

22. Liu D.V., Tuan W.Y. Microstructure and thermal conduction properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ag composites, *Acta Mater*, 1996, Vol. 44, No. 2, pp. 813-818.
23. Liu D.-M., Tuan W.H., Chiu Ch.-Ch. Thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity in  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Ni composite, *Mater. Science and Engineering B*, 1995, Vol. 31, pp. 287-291.
24. Berman R. *Теплопроводность' твердых тел* [The thermal conductivity of solids]. Moscow: Mir, 1979, 286 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

**Карбань Оксана Владиславовна** – ФТИ УрО РАН; e-mail: ocsa123@yahoo.com; 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 11; тел.: +79225056346; кафедра физики; д.ф.-м.н.; профессор.

**Саламатов Евгений Иванович** – e-mail: salam@otf.fti.udmurtia.su; 426000, г. Ижевск, ул. Кирова, 132; тел.: +73412216933; отдел теоретической физики; г.н.с.; д.ф.-м.н.

**Karban Oxana Vladislavovna** – Physico-technical Institute, Ural branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: ocsa123@yahoo.com; 11, Studencheskaya street, Izhevsk, 426069, Russia; phone: +79225056346; the department of physics; dr.of phys.-math. sc.; professor.

**Salamatov Evgeniy Ivanovich** – e-mail: salam@otf.fti.udmurtia.su; phone: +73412216933; 132, Kirova street, Izhevsk, 426000, Russia; the department of theoretical physics chief researcher; dr.of phys.-math. sc.

УДК 621.38-022.532

DOI 10.23683/2311-3103-2017-4-201-211

**М.С. Солодовник**

### **ФАЗООБРАЗОВАНИЕ В СИСТЕМЕ Ga-As-O В УСЛОВИЯХ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ**

*Представлены результаты теоретических исследований термодинамики процессов фазообразования в системе Ga-As-O с учетом специфики условий, наблюдаемых при молекулярно-лучевой эпитаксии арсенидов металлов III группы. Представлены результаты расчетов двойных и тройных фазовых диаграмм состояний, возможных в рассматриваемой системе в заданных диапазонах температур и давлений, характерных для экспериментально наблюдаемых в технологии молекулярно-лучевой эпитаксии процессов. Проведен анализ всех возможных промежуточных и конечных продуктов реакций взаимодействия между компонентами и их формами в системе Ga-As-O. На основе анализа фазовых диаграмм и вероятных продуктов реакций определены и составлены уравнения основных и промежуточных химических реакций, протекающих в системе. Рассчитаны температурные зависимости изменений свободной энергии Гиббса  $\Delta G(T)$  для всех основных и промежуточных реакций между основными компонентами рассматриваемой системы: кристаллическим GaAs (подложка), атомарным Ga и молекулярным  $\text{As}_4$  из парогазовой фазы (поток ростовых компонент) и компонентами собственного оксида GaAs. На основе анализа изменений энергий Гиббса полученных уравнений показано, что компоненты собственного оксида GaAs вступают в химические реакции не только с кристаллическим GaAs и Ga из паровой фазы, но и с потоком молекулярного As, а также участвуют в твердофазных реакциях между собой. Установлено, что в процессах взаимодействия оксида GaAs с ростовыми компонентами и объемным материалом в качестве продуктов реакции образуются не только летучие монооксид  $\text{Ga}_2\text{O}$  и молекулярный  $\text{As}_2(\text{As}_4)$ , но и монооксид  $\text{AsO}$ , возникающий как в ходе прямого разложения As-содержащих компонент оксидной пленки, так и в процессах их взаимодействия с молекулярными потоками. Также установлено, что реакции с прямым образованием преимущественно летучими соединениями начинают доминировать при температурах подложки выше 550 °С. Это позволяет оптимизировать процесс термической десорбции оксидов GaAs в технологии молекулярно-лучевой эпитаксии GaAs за счет подавления реакций с образованием  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , негативным образом влияющих на морфологию подложки путем непосредственного взаимодействия с ней.*

*Молекулярно-лучевая эпитаксия; арсенид галлия; собственный оксид; фазообразование; термодинамика; оксид галлия; оксид мышьяка.*

M.S. Solodovnik

## THE PHASE FORMATION IN THE Ga-As-O SYSTEM UNDER CONDITIONS OF MOLECULAR BEAM EPITAXY

*The paper presents the results of theoretical studies of the thermodynamics of phase formation processes in the Ga-As-O system, taking into account the specific conditions observed in molecular beam epitaxy of group III arsenides. The results of calculations of the double and triple phase diagrams which are possible in the system under conditions at given temperature and pressure ranges characteristic for the observed experimentally processes in the molecular beam epitaxy technology are presented. The analysis of all possible intermediate and final reaction products of the interaction between the components and their forms in the Ga-As-O system is carried out. Based on the analysis of phase diagrams and probable reaction products, the equations of basic and intermediate chemical reactions occurring in the system are determined and compiled. The temperature dependences of the changes in the free Gibbs energy  $\Delta G(T)$  for all the main and intermediate reactions between the main components of the system – crystal GaAs (substrate), atomic Ga and molecular  $As_4$  from the vapor phase (fluxes of growth components) and GaAs native oxide components – are calculated. Based on the analysis of Gibbs energy changes for the obtained equations, we showed that the components of GaAs native oxide enter into chemical reactions not only with crystalline GaAs and Ga from the vapor phase, but also with the molecular As flux, and also participate in solid-phase reactions between themselves. It is established that in the processes of interaction of GaAs native oxide with growth components and bulk material, not only volatile monoxide  $Ga_2O$  and molecular  $As_2$  ( $As_4$ ) are formed as reaction products, but also monoxide AsO that occurs both during direct decomposition of As-containing oxide film components, and in the processes of their interaction with molecular fluxes. It has also been found that reactions with direct formation predominantly volatile compounds begin to dominate at substrate temperatures above 550°C. This makes it possible to optimize the process of thermal desorption of GaAs oxides in the technology of molecular beam epitaxy of GaAs by suppressing the reactions with the formation of  $Ga_2O_3$ , which negatively affects the morphology of the substrate by direct interaction with it.*

*Molecular-beam epitaxy; gallium arsenide; intrinsic oxide; phase formation; thermodynamics; gallium oxide; arsenic oxide.*

**Введение.** Получение поверхностей GaAs с низкой шероховатостью и сохранение целенаправленно сформированного рельефа очень важно для синтеза упорядоченных массивов самоорганизующихся полупроводниковых наноструктур с высокой структурной однородностью и точным размещением отдельных его элементов [1–5]. Поверхность GaAs в обычных условиях покрыта пленкой собственного окисла, тонкие слои которого пассивируют поверхность подложки и препятствуют дальнейшему её окислению [6, 7]. Толщина оксида составляет 2–3 нм и практически не изменяется со временем [8, 9] в отличие от шероховатости, которая с течением времени возрастает с 4–5 до 15 нм [8]. Окисел имеет аморфную структуру и состоит из  $Ga_2O_3$ ,  $As_2O_3$ ,  $As_2O_5$  и элементарного As, скапливающегося на границе с кристаллической подложкой и между зёрнами [10–13]. Элементарный As выделяется в результате как медленной реакции в катионной подрешетке, так и еще более медленной твердофазной реакции на границе окисел/подложка [12].

В процессе молекулярно-лучевой эпитаксии окисел, как правило, удаляется термически, в том числе, за счет взаимодействия с кристаллическим материалом подложки [14]. При этом существенно ухудшается морфология поверхности. Как было показано в [15], основной причиной этого является травление поверхности оксидами As. Исследование процессов взаимодействия собственного окисла GaAs с поверхностью подложки и ростовыми компонентами при молекулярно-лучевой эпитаксии позволяет минимизировать их влияние на морфологию поверхности,

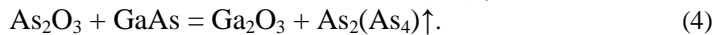
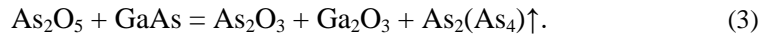
что особенно актуально для задач наноразмерного структурирования поверхности, а также синтеза эпитаксиальных наноструктур [16–20]. Целью данной работы является исследование процессов фазообразования в системе Ga-As-O в условиях, характерных для процесса молекулярно-лучевой эпитаксии.

**Методика исследований.** Исследование процессов фазообразования в системе Ga-As-O проводилось с использованием программного пакета для термодинамических расчетов FactSage 6.3. На первом этапе рассчитывались двойные и тройные фазовые диаграммы в системе Ga-As-O и анализировались вероятные продукты реакций. Затем определялись и сравнивались температурные зависимости изменений свободной энергии Гиббса  $\Delta G(T)$ , на основании чего устанавливались наиболее вероятные промежуточные и основные (суммарные) уравнения химических реакций. Применение подходов равновесной термодинамики является оправданным в приближении квазиравновесного характера процесса МЛЭ [11]. Анализ процессов проводился при значениях давления в ростовой камере  $10^{-7}$ – $10^{-5}$  Па, характерных для молекулярно-лучевой эпитаксии арсенидов III группы, и температурах в диапазоне 100–1000 °С. Рассмотрение процессов взаимодействия кристаллического GaAs и ростовых компонент Ga и As<sub>4</sub> из парогазовой фазы с его естественным окислом проводилось с учетом его многокомпонентного состава. Для упрощения восприятия результатов расчетов стехиометрические коэффициенты в уравнениях химических реакций опущены.

**Результаты и обсуждение.** Анализ фазовых диаграмм в системе Ga-As-O при различных температурах поверхности показал, что оксиды мышьяка As<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в процессе нагрева образца GaAs с пленкой собственного окисла могут разлагаться напрямую с образованием летучих AsO и O<sub>2</sub>:

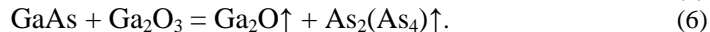
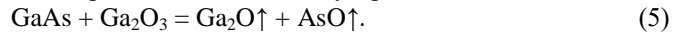


и участвовать в твердофазных реакциях с объемным GaAs:



Температурные зависимости изменения энергии Гиббса  $\Delta G(T)$  для реакций (1)–(4) представлены на рис. 1. Анализ зависимостей  $\Delta G(T)$  показывает, что реакции разложения оксидов мышьяка (1) и (2) начинают протекать в прямом направлении при 337 °С и 318 °С, соответственно. До температуры 545 °С преимущество имеют твердофазные реакции (3) и (4). При превышении температуры подложки 545 °С As<sub>2</sub>O<sub>5</sub> с большей вероятностью будет участвовать в реакции (1), чем в (3). Для As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> преобладание реакции прямого разложения (2) над реакцией с материалом подложки (4) наступает при 565 °С.

Оксид галлия Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> термически более стабильный, чем оксиды мышьяка, и может взаимодействовать с поверхностью GaAs по двум реакциям:



Как видно из зависимостей изменения энергии Гиббса  $\Delta G(T)$  для (5), (6), изображенных на рис. 2, реакция Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с объемным GaAs с выделением молекулярного As в виде димеров и/или тетрамеров (6) начинается при 430 °С, в то время как реакция (5) – только при 554 °С. Во всем диапазоне рассматриваемых температур вероятность протекания реакции (5) в прямом направлении ниже, чем (6).

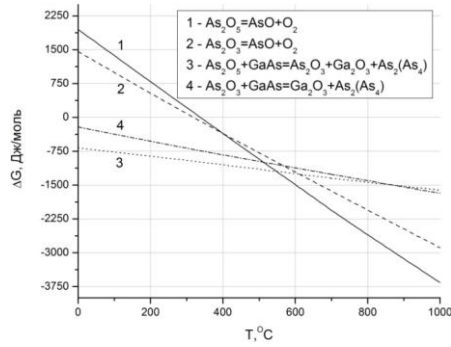


Рис. 1. Температурные зависимости изменения энергии Гиббса  $\Delta G(T)$  для реакций разложения и взаимодействия оксидов мышьяка с GaAs

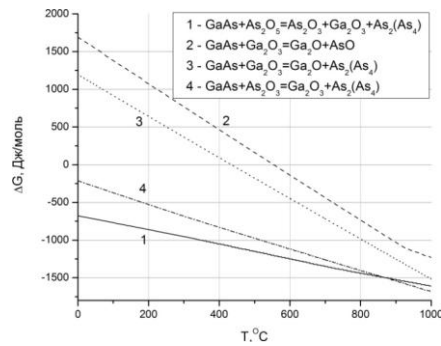


Рис. 2. Температурные зависимости изменения энергии Гиббса  $\Delta G(T)$  для реакций взаимодействия GaAs с компонентами собственного оксида

Реакции взаимодействия компонент оксида GaAs с атомарным Ga и молекулярным  $As_4$  из парогазовой смеси в процессе МЛЭ GaAs определялись на основе анализа тройных фазовых диаграмм в системе Ga-As-O, рассчитанных в диапазоне температур 25–600 °C с учетом результатов, полученных выше. На рис. 3 приведена диаграмма состояний Ga-As-O, полученная при температуре 600 °C.

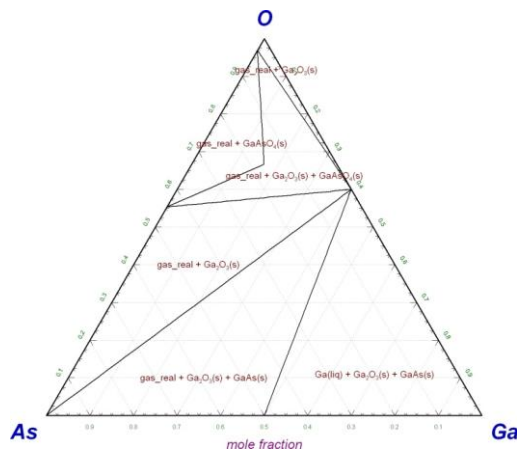
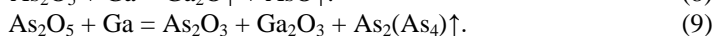


Рис. 3. Диаграмма состояний в системе Ga-As-O при температуре 600 °C и давлении  $10^5$  Па

Взаимодействие  $\text{As}_2\text{O}_5$  с атомарным галлием из паровой фазы может протекать по реакциям вида:



Анализ зависимостей  $\Delta G(T)$  для реакций (7)–(9), представленных на рис. 4, показывает, что в области низких температур (до 300 °C) преимущественно протекает реакция (9), приводящая к одновременному образованию  $\text{As}_2\text{O}_3$  и  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  и выделению мышьяка в молекулярной форме. Начиная с 337 °C вероятность прямой реакции (8) становится выше: в продуктах реакции исчезает промежуточный  $\text{As}_2\text{O}_3$ , а мышьяк начинает выделяться в форме  $\text{AsO}$ . Это обусловлено тем, что, как было показано выше, при данной температуре начинается реакция (2) с прямым термическим разложением  $\text{As}_2\text{O}_3$ .

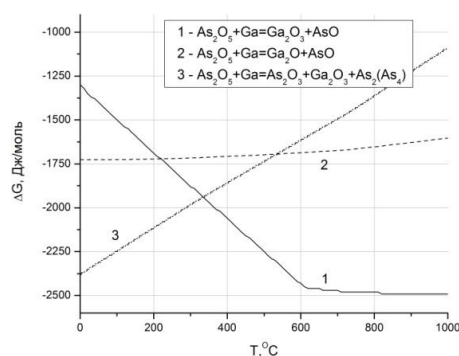
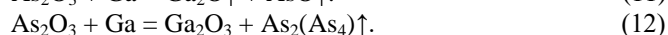
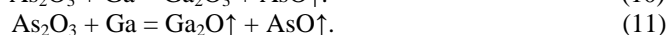
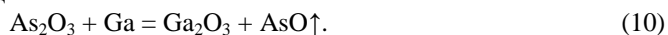


Рис. 4. Температурные зависимости изменения энергии Гиббса  $\Delta G(T)$  для реакций взаимодействия  $\text{As}_2\text{O}_5$  с потоком атомарного Ga

Уравнения реакций взаимодействия между  $\text{As}_2\text{O}_3$  и Ga из атомарного потока к поверхности имеют вид:



Зависимости  $\Delta G(T)$  для реакций (10)–(12) представлены на рис. 5.

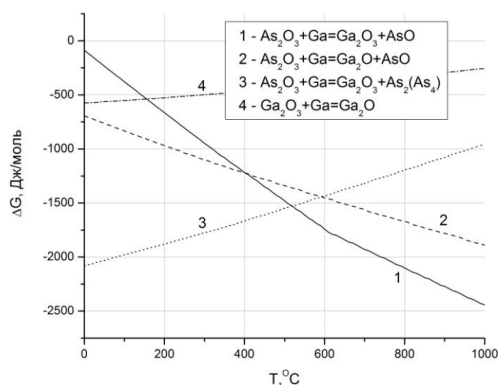
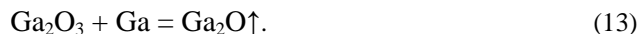


Рис. 5. Температурные зависимости изменения энергии Гиббса  $\Delta G(T)$  для реакций взаимодействия  $\text{As}_2\text{O}_3$  и  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  с потоком атомарного Ga

Видно, что до 520 °С с наибольшей вероятностью будет протекать реакция (12), а после – реакция (10), что обусловлено, видимо, возрастанием химической активности мышьяка при повышении температуры.

Оксид галлия реагирует с Ga из паровой фазы во всем рассматриваемом температурном диапазоне (рис. 5) с образованием летучего оксида одновалентного галлия:



Взаимодействие компонент оксида GaAs с молекулярным мышьяком из паровой фазы протекает с образованием летучих AsO и Ga<sub>2</sub>O по реакциям вида:



На рис. 6 представлены зависимости  $\Delta G(T)$  для рассматриваемых реакций. Как видно из рисунка, взаимодействие потока As<sub>4</sub> с оксидами мышьяка идет с большей вероятностью, чем с Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а вероятность протекания реакции в прямом направлении возрастает с увеличением валентности мышьяка в составе оксида. Реакция (16) начинается при 560 °С и протекает с образованием сразу двух летучих соединений – монооксидов мышьяка и галлия.

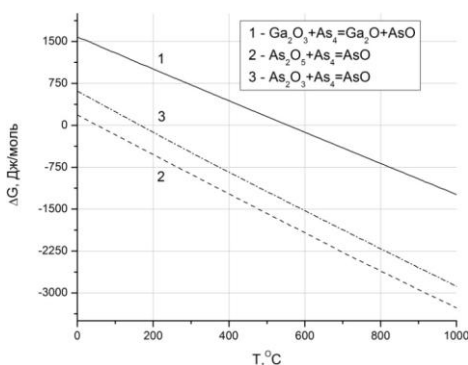
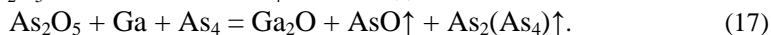


Рис. 6. Температурные зависимости изменения энергии Гиббса  $\Delta G(T)$  для реакций взаимодействия компонент оксида GaAs с потоком молекулярного As<sub>4</sub>

Характер взаимодействия компонент оксида при одновременной подаче Ga и As<sub>4</sub> будет обуславливаться особенностями реакций с ростовыми компонентами в отдельности.

Реакции As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с потоками Ga и As<sub>4</sub> имеют вид:



Температурные зависимости изменения энергии Гиббса  $\Delta G(T)$  для реакций (17)–(19) представлены на рис. 7.

Анализ полученных зависимостей показывает, что протекание реакции (17) наименее вероятно во всем температурном диапазоне. До 555 °С будет преимущественно идти реакция (19), а при дальнейшем повышении температуры – реакция (18), что, видимо, обусловлено интенсификацией реакции (10) при данных температурах.



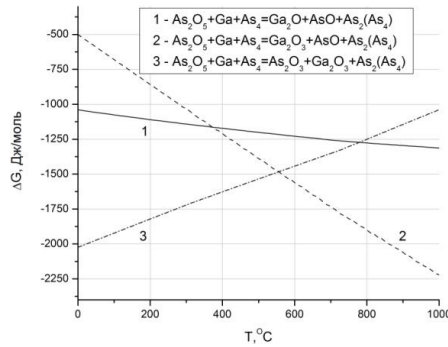


Рис. 7. Температурные зависимости изменения энергии Гиббса  $\Delta G(T)$  для реакций взаимодействия  $As_2O_5$  с ростовыми компонентами

Взаимодействие между  $As_2O_3$  и потоками ростовых компонент представлено реакциями:



Зависимости  $\Delta G(T)$  для данных реакций на рис. 8, показывают, что, несмотря на возможность протекания в прямом направлении всех реакций во всем температурном диапазоне, в области ростовых температур будет преобладать реакция (21), все продукты которой находятся в газообразном состоянии.

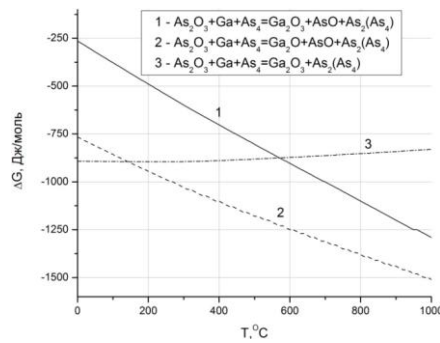
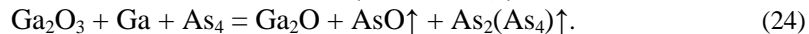
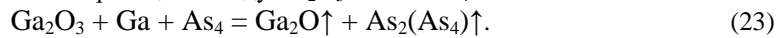


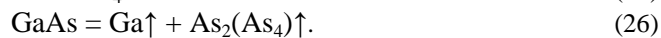
Рис. 8. Температурные зависимости изменения энергии Гиббса  $\Delta G(T)$  для реакций взаимодействия  $As_2O_3$  с ростовыми компонентами

Среди возможных реакций между  $Ga_2O_3$  и Ga и  $As_4$ :



Как видно из рис. 9, в области ростовых температур преобладает реакция (23). Отметим, что реакция (24), включающая в себя реакцию (16), начинается при существенно более низких температурах процесса – 460 °C для (24) против 560 °C для (16), что может быть обусловлено выделением атомарного As с процессе реакции (16) и его последующим взаимодействием с  $Ga_2O_3$ .

При этом необходимо учитывать, что одновременно с реакциями взаимодействия между компонентами окисла и объемным GaAs и его составляющими из паровой фазы могут протекать реакции образования GaAs из молекулярных потоков и его термической диссоциации:



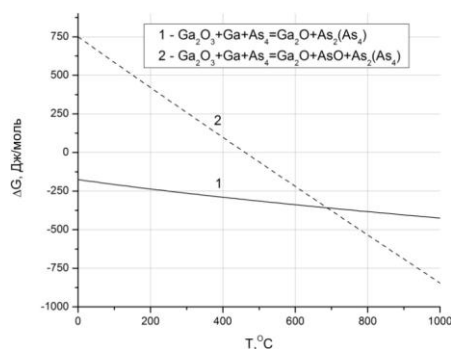


Рис. 9. Температурные зависимости изменения энергии Гиббса  $\Delta G(T)$  для реакций взаимодействия  $Ga_2O_3$  с ростовыми компонентами

На рис. 10 представлены полученные зависимости  $\Delta G(T)$  для реакций (25), (26). Анализ зависимостей показывает, что реакция разложения GaAs на элементарные составляющие (26) начинается при температуре 520 °С. Учитывая, что реакция (13) протекает при данной температуре с большей вероятностью, чем (6), можно предположить, что наблюдаемое на практике начало процесса удаления окисла при 530 °С обусловлено не только возрастанием скорости реакции (6) с увеличением температуры поверхности, но и началом более предпочтительной реакции (13) вследствие активации реакции (26).

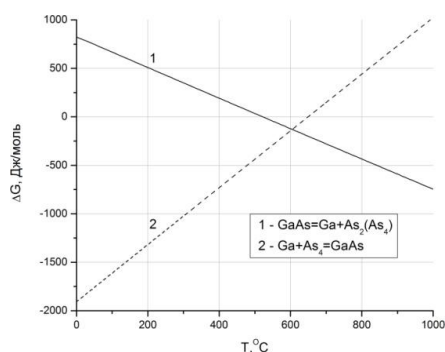


Рис. 10. Температурные зависимости изменения энергии Гиббса  $\Delta G(T)$  для реакций образования и термической диссоциации GaAs

**Заключение.** Таким образом, проведенный анализ термодинамических закономерностей процессов фазообразования в системе Ga-As-O при МЛЭ GaAs показал, что компоненты оксида вступают в химические реакции не только с объемным GaAs и Ga из паровой фазы, но и с потоком молекулярного As. Показано, что в процессах взаимодействия оксида GaAs с ростовыми компонентами и объемным материалом в качестве продуктов реакции образуются не только летучие  $Ga_2O$  и  $As_2(As_4)$ , но и AsO, возникающий как в ходе прямого разложения содержащих мышьяк компонент оксидной пленки, так и в процессах их взаимодействия с молекулярными потоками. Кроме того, было показано, что при температурах выше 550 °С доминируют реакции с образованием летучих соединений.

Исследование выполнено за счет гранта Президента РФ (проект № МК-2629.2017.8). Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования и Научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Южного федерального университета.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ageev O.A., Balakirev S.V., Bykov A.V. et al. Development of new meta-materials for advanced element base of micro- and nanoelectronics, and microsystem devices // In: Advanced Materials – Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications. Parinov, Chang, Topolov (Eds.). – Springer International Publishing Switzerland, 2016. – P. 563-580.
2. Ageev O.A., Коноплев Б.Г. и др. Исследование влияния геометрических параметров на модуль Юнга ориентированных нитевидных нанокристаллов GaAs методом атомно-силовой микроскопии // Российские нанотехнологии. – 2013. – Т. 8, № 1-2. – С. 20-25.
3. Рукомошкин А.В., Солодовник М.С. Формирование и исследование арсенид-галлиевых наноструктур на нанотехнологическом комплексе НАНОФАБ НТК-9 // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 4 (117). – С. 237-238.
4. Ageev O.A., Алексеев А.Н., Соколов И.А., Коноплев Б.Г. Комплексный подход к технологическому оснащению центра прикладных разработок. Опыт реализации в НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 4 (117). – С. 207-210.
5. Алексеев А.Н., Ageev O.A. и др. Тандем ЗАО «НТО» и НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ – пример успешного взаимодействия производства и науки // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2016. – № 7 (157). – С. 78-83.
6. Ageev O.A., Варзарев Ю.Н., Солодовник М.С., Рукомошкин А.В. Получение и исследование НЕМТ-структур на основе GaAs для СВЧ-полевых транзисторов на нанотехнологическом комплексе НАНОФАБ НТК-9 // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 4 (117). – С. 13-21.
7. Ageev O.A., Балакирев С.В., Солодовник М.С., Еременко М.М. Влияние взаимодействия в системе Ga-As-O на морфологию поверхности GaAs при молекулярно-лучевой эпитаксии // Физика твердого тела. – 2016. – Т. 58, № 5. – С. 1011-1018.
8. Allwood D.A., et al. Characterization of oxide layers on GaAs substrates // Thin Solid Films. – 2000. – Vol. 364. – P. 333-39.
9. Tanner B.K., et al. Kinetics of native oxide film growth on epitaxial GaAs // Materials Science and Engineering B. – 2001. – Vol. 80. – P. 99-103.
10. Vilar M.R., et al. Characterization of wet-etched GaAs (100) surfaces // Surface and Interface Analysis. – 2005. – Vol. 37. – P. 673-682.
11. Безрядин Н.Н., и др. Влияние финишной подготовки поверхности арсенида галлия на спектр электронных состояний n-GaAs(100) // ФТП. – 2012. – № 6. – С. 756-760.
12. Валюхов Д.П., и др. Исследование взаимодействия кислорода с поверхностью (110) АЗВ5 // Вестник СКГТУ. – 2010. – № 2. – С. 1-6.
13. Bauters J.F., et al. Oxygen-enhanced wet thermal oxidation of GaAs // Applied Physics Letters. – 2011. – Vol. 99. – P. 142111.
14. Isomura N., et al. Investigation on GaAs(001) surface treated by As-free high temperature surface cleaning method // Journal of Crystal Growth. – 2007. – Vol. 301-302. – P. 26-29.
15. Guillen-Cervantes A., et al. GaAs surface oxide desorption by annealing in ultra-high vacuum // Thin Solid Films. – 2000. – Vol. 373. – P. 159-163.
16. Ageev O.A., Солодовник М.С., Смирнов В.А. и др. Исследование режимов формирования оксидных наноразмерных структур арсенида галлия методом локального анодного окисления // Известия вузов. Электроника. – 2012. – № 2 (94). – С. 43-50.
17. Ageev O.A., Солодовник М.С., Смирнов В.А. и др. Исследование режимов локального анодного окисления эпитаксиальных структур арсенида галлия // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 4 (117). – С. 8-13.
18. Авилов В.И., Краснобородько С.Ю. и др. Профилирование эпитаксиальных слоев арсенида галлия методом локального анодного окисления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 9 (170). – С. 84-93.
19. Авилов В.И., Ageev O.A. и др. Исследование режимов наноразмерного профилирования поверхности эпитаксиальных структур арсенида галлия методом локального анодного окисления // Российские нанотехнологии. – 2015. – Т. 10, № 3-4. – С. 39-43.
20. Ageev O.A., Solodovnik M.S., et al. Effect of GaAs native oxide upon the surface morphology during GaAs MBE growth // Journal of Physics: Conference Series. 2016. – Vol. 741, No. 1. – P. 012012.

## REFERENCES

1. Ageev O.A., Balakirev S.V., Bykov A.I. et al. Development of new meta-materials for advanced element base of micro- and nanoelectronics, and microsystem devices, *In: Advanced Materials – Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications*. Parinov, Chang, Topolov (Eds.). Springer International Publishing Switzerland, 2016, pp. 563-580.
2. Ageev O.A., Konoplev B.G. i dr. Issledovanie vliyaniya geometricheskikh parametrov na modul' Yunga orientirovannykh nitevidnykh nanokristallov GaAs metodom atomno-silovoy mikroskopii [A study of the influence of geometric parameters on young's modulus of oriented filamentary nanocrystals of GaAs by atomic force microscopy], *Rossiyskie nanotekhnologii* [Nanotechnologies in Russia], 2013, Vol. 8, No. 1-2, pp. 20-25.
3. Rukomoykin A.V., Solodovnik M.S. Formirovanie i issledovanie arsenid-gallievykh nanostruktur na nanotekhnologicheskom komplekse NANOFAB NTK-9 [Forming and investigation of arsenide gallium nanostructure at nanotechnological system NANOFAB NTF-9], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 237-238.
4. Ageev O.A., Alekseev A.N., Sokolov I.A., Konoplev B.G. Kompleksnyy podkhod k tekhnologicheskomu osnashcheniyu tsentra prikladnykh razrabotok. opyt realizatsii v NOTs «Nanotekhnologii» YuFU [Comprehensive approach to technological equipping for R&D center. The experience in implementing of SEC «Nanotechnology» SFedU], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 207-210.
5. Alekseev A.N., Ageev O.A. i dr. Tandem ZAO «NTO» i NOTs «Nanotekhnologii» YuFU – primer uspeshnogo vzaimodeystviya proizvodstva i nauki [Tandem CJSC "NTO" and REC "Nanotechnology" of southern Federal University – an example of successful cooperation of production and science], *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: science, technology, business], 2016, No. 7 (157), pp. 78-83.
6. Ageev O.A., Varzarev Yu.N., Solodovnik M.S., Rukomoykin A.V. Poluchenie i issledovanie HEMT-struktur na osnove GaAs dlya SVCh-polevykh tranzistorov na nanotekhnologicheskom komplekse NANOFAB NTK-9 [Obtaining and investigation of HEMT-structure based on GaAs for ultra high frequency field effect transistors at nanotechnological system NANOFAB NTF-9], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 13-21.
7. Ageev O.A., Balakirev S.V., Solodovnik M.S., Eremenko M.M. Vliyanie vzaimodeystviya v sisteme Ga-As-O na morfologiyu poverkhnosti GaAs pri molekulyarno-luchevoy epitaksii [The effect of interaction in the system Ga-As-O on the surface morphology of GaAs during molecular-beam epitaxy], *Fizika tverdogo tela* [Physics of the solid state], 2016, Vol. 58, No. 5, pp. 1011-1018.
8. Allwood D.A., et al. Characterization of oxide layers on GaAs substrates, *Thin Solid Films*, 2000, Vol. 364, pp. 333-39.
9. Tanner B.K., et al. Kinetics of native oxide film growth on epitaxial GaAs, *Materials Science and Engineering B*, 2001, Vol. 80, pp. 99-103.
10. Vilar M.R., et al. Characterization of wet-etched GaAs (100) surfaces, *Surface and Interface Analysis*, 2005, Vol. 37, pp. 673-682.
11. Bezryadin N.N., i dr. Vliyanie finishnoy podgotovki poverkhnosti arsenida galliya na spektr elektronnykh sostoyaniy n-GaAs(100) [The influence of finish surface preparation of gallium arsenide on the spectrum of electronic States of n-GaAs(100)], *FTP* [Physics], 2012, No. 6, pp. 756-760.
12. Valyukhov D.P., i dr. Issledovanie vzaimodeystviya kisloroda s poverkhnost'yu (110) A3B5 [Study of the interaction of oxygen with the surface (110) A3B5], *Vestnik SKGTU* [Bulletin of North Caucasus state technical University], 2010, No. 2, pp. 1-6.
13. Bauters J.F., et al. Oxygen-enhanced wet thermal oxidation of GaAs, *Applied Physics Letters*, 2011, Vol. 99, pp. 142111.
14. Isomura N., et al. Investigation on GaAs(001) surface treated by As-free high temperature surface cleaning method, *Journal of Crystal Growth*, 2007, Vol. 301-302, pp. 26-29.
15. Guillen-Cervantes A., et al. GaAs surface oxide desorption by annealing in ultra-high vacuum, *Thin Solid Films*, 2000, Vol. 373, pp. 159-163.

16. Ageev O.A., Solodovnik M.S., Smirnov V.A. *i dr.* Issledovanie rezhimov formirovaniya oksidnykh nanorazmernykh struktur arsenida galliya metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya [The study of the modes of formation of nanoscale oxide structures of gallium arsenide by local anodic oxidation], *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Proceedings of universities. Electronics], 2012, No. 2 (94), pp. 43-50.
17. Ageev O.A., Solodovnik M.S., Smirnov V.A. *i dr.* Issledovanie rezhimov lokal'nogo anodnogo okisleniya epitaksial'nykh struktur arsenida galliya [Gallium arsenide epitaxial structures local anodic oxidation regimes investigation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 8-13.
18. Avilov V.I., Krasnoborod'ko S.Yu. *i dr.* Profilirovanie epitaksial'nykh sloev arsenida galliya metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya [Gallium arsenide epitaxial structures profiling by local anodic oxidation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 9 (170), pp. 84-93.
19. Avilov V.I., Ageev O.A. *i dr.* Issledovanie rezhimov nanorazmernogo profilirovaniya poverkhnosti epitaksial'nykh struktur arsenida galliya metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya [The study of modes of nanoscale profiling of the surface of epitaxial structures of gallium arsenide by local anodic oxidation], *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian nanotechnology], 2015, Vol. 10, No. 3-4, pp. 39-43.
20. Ageev O.A., Solodovnik M.S., *et al.* Effect of GaAs native oxide upon the surface morphology during GaAs MBE growth, *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, Vol. 741, No. 1, pp. 012012.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

**Солодовник Максим Сергеевич** – Южный федеральный университет; e-mail: solodovnikms@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е; тел.: +78634371767; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

**Solodovnik Maxim Sergeevich** – Southern Federal University; e-mail: solodovnikms@sfedu.ru; 2, Shevchenko street, build. E, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371767; the department of nanotechnologies and microsystems; cand. eng. sc.; associate professor.