

Д. х. н. В. А. ВОРОНИН, к. т. н. С. К. ГУБА,
д. ф.-м. н. И. В. КУРИЛО

Украина, г. Львов, НУ «Львовская политехника»
E-mail: gubask@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
19.05 2008 г.

Оппонент д. х. н. В. Н. ТОМАШИК
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ИЗ ПАРОВОЙ ФАЗЫ ГЕТЕРО- И НАНОСТРУКТУР СОЕДИНЕНИЙ III–V

Исследованы технологические условия формирования перенасыщенной паровой фазы при низкотемпературной газотранспортной эпитаксии для выращивания гетеро- и наноструктур на основе соединений $In_{1-x}Ga_xAs$, $GaAs_{1-x}P_x$.

Дальнейшее развитие современной полупроводниковой электроники связано с прогрессом в области технологий. Одной из основных задач технологии является получение высококачественных гетеро- и наноструктур заданного состава. Особое место среди широкого класса этих материалов занимают соединения $GaAs_xP_{1-x}$, $In_xGa_{1-x}As$ и $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ — одни из наиболее перспективных материалов для создания на их основе полевых транзисторов, инжекционных лазеров, фотокатодов и др. [1].

На практике получение гетеро- и наноструктур на основе соединений III–V осуществляется методом химического осаждения из газовой фазы, где источником основных компонентов являются их летучие соединения. Свойства и совершенство гетеро- и наноструктур в большой степени зависят от кинетических особенностей массопереноса и химического взаимодействия в паровой фазе, а также от гетерофазных реакций в зонах источника и подложки. Перспективы развития методов парофазной эпитаксии в хлоридной системе в значительной мере связаны с исследованиями низкотемпературной эпитаксии [2, 3]. Этот метод может успешно использоваться для получения гетеро- и наноструктур с квантово-размерными слоями [4]. Однако при низких температурах формирование паровой фазы является неравновесным процессом, в котором ее состав сильно зависит от геометрии реактора, поля скоростей газа-носителя, площади источника и профиля температуры. В таких условиях может наблюдаться наибольшая нестабильность состава газовой фазы и чувствительность системы к изменению макропараметров технологических процессов.

Методы термодинамики позволяют получить надежные данные о равновесном составе газовой фазы и термодинамических функциях компонентов [5, 6], но вопрос о кинетических параметрах системы и механизме отдельных реакций остается открытым и, в первую очередь, это касается зоны формирования газовой фазы. Очевидно, что управление составом со-

единения в пределах области гомогенности в условиях паровой эпитаксии является сложной физико-химической задачей. Химизм реакций в рабочем объеме эпитаксиальной установки для многих важных систем еще неизвестен. Неизвестен также точный состав газовой фазы в зоне роста. Поэтому целью работы является теоретическое обоснование и обобщение термодинамики физико-химических закономерностей парофазного синтеза и кристаллизации гетеро- и наноструктур соединений III–V — $GaAs_xP_{1-x}$, $In_xGa_{1-x}As$ и $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$.

Для непосредственного определения состава газовой фазы и химизма процесса в реакторе, которые зависят от входных концентраций и температурного профиля, был использован in-situ-метод УФ-спектроскопии [7]. Установка, на которой проводились исследования состава паровой фазы в процессе химических реакций, описана в [8]. В процессе экспериментов при разных технологических режимах регистрировались спектры пропускания всей системы с последующей математической обработкой. Величину оптической плотности паровой смеси рассчитывали по формуле

$$\alpha(\lambda) = \ln \frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)}, \quad (1)$$

где $I_0(\lambda)$ — собственное пропускание оптической системы;
 $I(\lambda)$ — суммарное пропускание оптической системы и реакционной паровой смеси;
 λ — длина волны.

Эксперимент происходил в открытой кварцевой трубе, аналогичной по геометрическим параметрам зоне источника горизонтального реактора [9]. Формирование первичной паровой фазы заданного состава осуществлялось традиционными для газовой эпитаксии средствами [8].

Анализ молекулярного спектра поглощения в интервале 220—360 нм дал возможность определить и сравнить концентрацию таких молекулярных форм: $AsCl_3$, As_2 , As_4 , $GaCl$, $GaCl_3$, $InCl$, $InCl_3$, $BiCl$, P_2 и P_4 .

Для ограничения числа типов молекулярных форм считали протекание химических реакций в газовой фазе не зависящим от содержания в ней компонентов, которые не входят в соответствующие уравнения химических реакций. Это позволило, учитывая аддитивность, исследовать отдельно подсистемы роста, а также рассматривать в подсистемах не больше трех

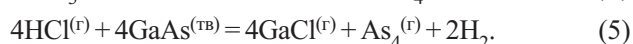
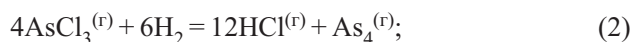
оптически наблюдаемых в указанном интервале длин волн составляющих спектра. Концентрацию компонентов, ответственных за поглощение, определяли по амплитуде поглощения на некоторой фиксированной длине волны, характерной для исследуемой молекулярной формы. Такое феноменологическое исследование дало возможность получить систему кинетических уравнений для источника, обнаружить границы существования различных молекулярных форм, определить технологические возможности формирования, контроля и управления процессом паровозной эпитаксии, получения гетеро- и наноструктур заданного состава, а также оценить чувствительность формирования паровой фазы к изменению макропараметров.

Состав газовой фазы на выходе из зоны источника определяется кинетикой реакции и зависит не только от температуры и начального состава химических реагентов, но и от поля скоростей парового потока в реакторе, его геометрии, площади источника, профиля температуры.

Рассмотрим условия, которые определяют состав компонентов на выходе из источника $\text{GaAs}_{(100)}$, $\text{GaP}_{(100)}$, In , Ga , In/Ga , которые отвечают таким газотранспортным системам: $\text{GaAs-AsCl}_3\text{-H}_2$, $\text{GaP-AsCl}_3\text{-H}_2$, $\text{GaP-PCl}_3\text{-H}_2$, Ga-In-HCl-H_2 .

Система $\text{GaAs-AsCl}_3\text{-H}_2$

В общем случае, в процессе прохождения газовой смеси в системе $\text{GaAs-AsCl}_3\text{-H}_2$ имеют место такие преобладающие химические реакции:



Окончательный состав в зоне роста над подложкой определяется степенью протекания каждой из реакций, а условие роста эпитаксиального слоя на ней — условием перенасыщения. Степень перенасыщения газовой среды определяется на основе фазового равновесия в гетерогенной реакции (5) при условии полного разложения AsCl_3 :

$$\Gamma(T) = \frac{C_{\text{GaCl}} C_{\text{H}_2}^2 C_{\text{As}_4}}{C_{\text{HCl}} K_{p_4}(T)} - 1, \quad (6)$$

где $\Gamma(T)$ — коэффициент перенасыщения газовой среды;
 C — концентрация соответствующих молекулярных форм реакции (5);
 $K_{p_4}(T)$ — константа равновесия реакции (5);
 T — температура.

Величина $\Gamma(T)$ может быть положительной и тем большей, чем больше отношение концентраций $C_{\text{GaCl}}/C_{\text{HCl}}$, и возрастает с увеличением соотношения вкладов каждой из реакций (4) и (5) в образование монохлорида галлия. При отсутствии по какой-то причине трихлорида мышьяка над источником арсенида галлия $\Gamma < 0$ и химический транспорт GaAs невозможен.

Качественный анализ кинетики реакций для системы $\text{GaAs-AsCl}_3\text{-H}_2$ позволяет утверждать следующее:

— состав газовой фазы на выходе из источника GaAs при $T < 750^\circ\text{C}$ отличается от термодинамически равновесного;

— при «классических» для метода газовой эпитаксии хлоридных систем температурах ($T > 750^\circ\text{C}$) зависимость концентрации хлорида от газодинамики незначительна, что гарантирует высокую стабильность работы твердофазного источника GaAs ;

— при условии сосуществования AsCl_3 и HCl реакции с GaAs идут преимущественно по брутто-механизму [10];

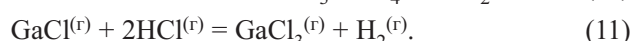
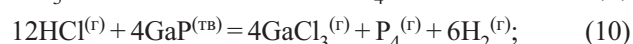
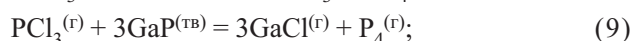
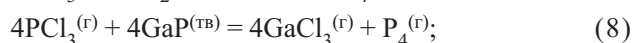
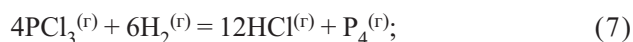
— в интервале температур $550\text{—}750^\circ\text{C}$ на величину отношения $C_{\text{GaCl}}/C_{\text{HCl}}$ можно эффективно влиять выбором геометрии реактора и линейной скоростью потока газовой смеси.

Особенностью системы $\text{GaAs-AsCl}_3\text{-H}_2$ является экспериментально зарегистрированная возможность эпитаксиального осаждения GaAs при температуре источника, меньшей или равной температуре подложки. Этот эффект связан с тем, что при $T > 650^\circ\text{C}$ рост проходит согласно реакции (5), а степень перенасыщения газовой фазы характеризуется уравнением (6). В то же время величина перенасыщения Γ зависит от того, по какой из реакций, (5) или (4), преимущественно образуется монохлорид галлия.

Осаждение в однотемпературной зоне реактора возможно при условии $600 < T < 750^\circ\text{C}$, т. к. ниже 600°C концентрация монохлорида галлия невысока, а выше 750°C отсутствует AsCl_3 . Малым значениям скорости потока ($V = 1\text{—}3$ см/с) отвечает высокая степень разложения трихлорида мышьяка и уменьшение вклада реакции (3) в формирование состава газовой фазы. Напротив, при больших значениях V не успевает развиться не только гомогенная реакция (2), но и гетерогенная (4). При этом, перед областью осаждения паровая фаза обогащается молекулами HCl и AsCl_3 , что уменьшает параметр перенасыщения Γ вплоть до отрицательного значения.

Системы $\text{GaP-PCl}_3\text{-H}_2$, $\text{GaP-AsCl}_3\text{-H}_2$

Рассмотрим условия, которые определяют состав компонентов на выходе из источника GaP , который отвечает эпитаксиальной системе $\text{GaP-PCl}_3\text{-H}_2$. В процессах образования продуктов реакции, поставляемых к подложке газовыми потоками, имеют место такие преобладающие химические реакции:



Характер разложения в системах $\text{PCl}_3\text{-H}_2$ и $\text{PCl}_3\text{-He}$ имеет ряд существенных отличий от системы $\text{GaAs-AsCl}_3\text{-H}_2\text{-He}$, что связано со значительно меньшей устойчивостью молекул трихлорида фосфора PCl_3 , по сравнению с трихлоридом мышьяка AsCl_3 , и более высокой стойкостью фосфида галлия, по срав-

нению с арсенидом галлия. Как известно, трихлорид мышьяка в атмосфере гелия устойчив и при нагревании, по крайней мере до 900°C, в его спектре не наблюдается никаких изменений.

Молекулы PCl_3 в атмосфере гелия, напротив, быстро разлагаются уже при $T > 750^\circ\text{C}$, что проявляется в появлении на кривой поглощения PCl_3 длинноволнового плеча, которое монотонно сдвигается в коротковолновую область с повышением температуры. Начиная с 600°C, максимум кривой поглощения перемещается от $\lambda = 226$ нм к $\lambda = 240$ нм при $T > 650^\circ\text{C}$.

Термодинамические оценки позволяют считать, что в интервале температур 150—500°C происходит разложение PCl_3 согласно реакции (6), а при $T > 600^\circ\text{C}$ молекулы фосфора P_4 преимущественно разлагаются на P_2 . Отметим, что вид спектров поглощения исследуемой системы не чувствителен к изменениям скорости потока газа в интервале от 3 до 70 см/с. Это означает, во-первых, что состав паровой фазы может определяться на основе равновесной термодинамики, а во-вторых, косвенно свидетельствует о том, что изменения в спектрах наблюдаются при разных значениях скорости потока и не связаны с отклонением температуры газа от температуры стенок реактора.

Низкотемпературное разложение молекул PCl_3 приводит к тому, что как в атмосфере гелия, так и в атмосфере водорода ни при каких температурных условиях не реализуется протекание реакций (7) и (8) с заметным выходом химических продуктов. Поэтому процесс формирования паровой фазы в атмосфере водорода может быть удовлетворительно описан на основе двух гетерогенных реакций — (9) и (10). Будем считать, что при температуре 950°C реакция (9) практически достигает равновесия, т. к. при $T > 950^\circ\text{C}$ интенсивность линий поглощения остается постоянной. Высокотемпературная чувствительность состава газовой фазы к величине линейной скорости парового потока заметно ниже, чем в случае арсенида галлия. Это приводит к тому, что состав паровой фазы на выходе из источника близок к равновесным значениям, а также снижает влияние неуправляемого колебания расхода газа на концентрацию компонентов. Однако «классические» значения температуры источников фосфида галлия (850—900°C) лежат в интервале температур, где dC/dt достаточно чувствительно (t — время, C — концентрация PCl_3 , AsCl_3) к газодинамическим условиям и другим макропараметрам технологического процесса, в отличие от типичных режимов, характерных для источников арсенида галлия.

Исследование концентрации C_{PCl_3} в интервале скоростей потока газовой смеси $V = 3\text{—}70$ см/с показало, что $C_{\text{PCl}_3}(T, V) = C_{\text{PCl}_3}(T)$, т. е. концентрации компонентов близки к равновесным. Из этого следует, что рост GaP или $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ в изотемпературных условиях при непосредственном участии PCl_3 в образовании GaCl невозможен вследствие разложения PCl_3 в атмосфере водорода при температуре ниже 500°C, недостаточной для формирования GaCl.

При замене источника PCl_3 на AsCl_3 характер зависимости $C_{\text{GaCl}}(T)$ для системы GaP— AsCl_3 — H_2 существенно не изменится, а все характерные макси-

мы функции сместятся на 50—60°C в область более высоких температур.

Перенасыщение в такой системе описывается формулой

$$\Gamma(T) = \frac{C_{\text{GaCl}} C_{\text{H}_2}^2 C_{\text{P}_4} C_{\text{As}_4}^{0,25(1-x)}}{C_{\text{HCl}} \alpha_{\text{GaAs}}^{1-x} \alpha_{\text{GaP}} K_p(T)} - 1, \quad (12)$$

где α — активность соответствующей компоненты в твердом растворе;

$K_p(T)$ — константа равновесия реакции осаждения.

Основную роль в выполнении условия $\Gamma(T) > 0$ играет отношение $C_{\text{AsCl}_3}/C_{\text{HCl}}$, которое определяется степенью непосредственного участия AsCl_3 в синтезе GaCl.

На рис. 1 приведены результаты расчета распределения концентраций AsCl_3 и GaCl в зоне источника GaP при различных температурах [11]. На исходную концентрацию неравновесного хлорида галлия может влиять также расстояние X от начала реактора до источника GaP. Она влияет, в частности, на степень разложения трихлорида мышьяка при фиксированных температуре и скорости потока газа-носителя. В области гетерогенного контакта фаз при скорости потока 1—3 см/с неравновесные компоненты могут успеть релаксировать с осаждением твердого раствора $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ вследствие протекания реакций (4) и (5). Следовательно, в системе GaP— AsCl_3 — H_2 в температурном интервале 600—700°C возможно создание перенасыщенной паровой фазы и осаждение эпитакси-

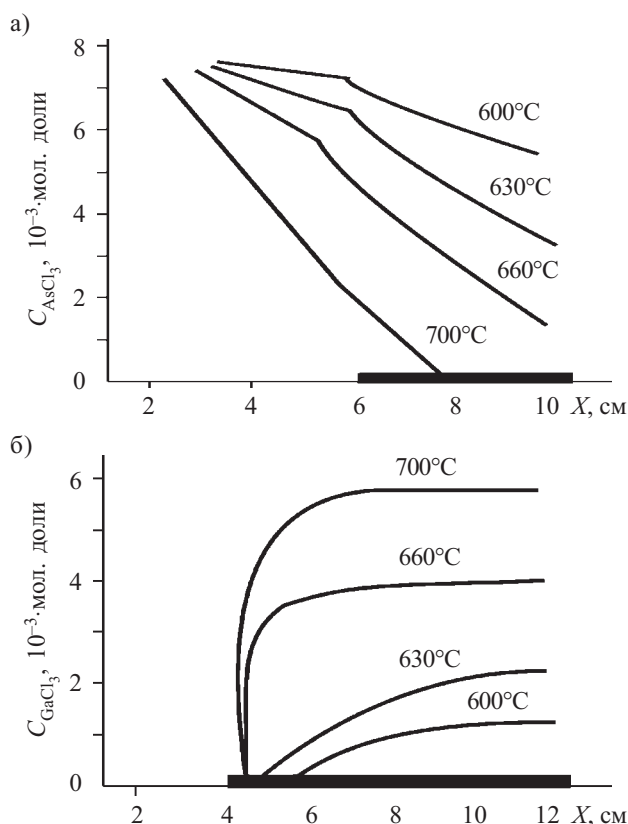


Рис. 1. Зависимость концентрации выхода AsCl_3 (а) и GaCl (б) от продольной координаты зоны источника GaP при различных температурах реактора ($V_{\text{H}_2} = 5$ см/с, $T_{\text{H}_2} = 20^\circ\text{C}$) [11]

альных пленок твердых растворов $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ ($x=0,75$) в изотемпературных условиях [12].

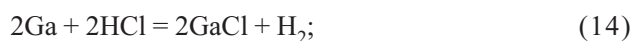
Система In-Ga-HCl-H_2

Стабильность состава паровой фазы в эпитаксиальном реакторе при осаждении изорешеточных с подложкой слоев $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в хлоридной системе In-Ga-HCl-H_2 — одно из наиболее существенных условий получения совершенных структур. В [3] рассматриваются различные варианты формирования смеси InCl и GaCl в зависимости от конфигурации источников и обосновано преимущество конструкции источника, приведенной на рис. 2.



Рис. 2. Схема источников In и Ga (отдельная ячейка)

Учитывая такую конструкцию, полагаем, что в источнике протекают три гетерогенные реакции:



Для расчета и моделирования зависимостей состава газа от температуры, входных концентраций реагентов и газодинамических условий в источнике необходимо знать кинетические характеристики гетерогенных химических реакций. Для их экспериментального определения использовался in-situ-метод УФ-спектроскопии. Зависимость концентрации реагентов (уравнения реакций (13) — (15)) от скорости газа-носителя V_{H_2} (рис. 3) содержит три характерных участка, протяженность которых определяется температурой, входной концентрацией HCl , соотношением размеров поверхности ячеек In и Ga в источнике [13]. При небольших скоростях потока состав смеси слабо зависит от ее изменения, а концентрации реагентов близки к равновесным. При увеличении скорости наблюдается уменьшение концентрации хлорида галлия и, как правило, увеличение содержания

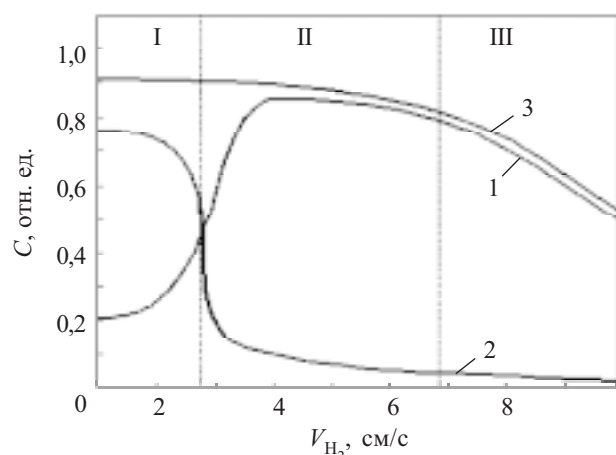


Рис. 3. Зависимость C_{InCl} (1), C_{GaCl} (2), $C_{\text{InCl}} + C_{\text{GaCl}}$ (3) от скорости потока H_2 ($T=620^\circ\text{C}$, $P^0(\text{HCl})=6,7$ мм рт. ст., $\text{Ga/In}=4$) [13]

хлорида индия. В случае, если концентрация In в источнике меньше, чем Ga , в паровой фазе может наблюдаться инверсия концентрации ($C_{\text{GaCl}}/C_{\text{InCl}}$). Дальнейший рост V_{H_2} вызывает уменьшение суммарной концентрации $C_{\text{InCl}} + C_{\text{GaCl}}$ вследствие неполного взаимодействия HCl с источником.

Концентрация соединений реакций (13) — (15) рассчитывалась путем сопоставления экспериментальных результатов in-situ-метода УФ-спектроскопии и решения системы уравнений как для независимых источников In и Ga , так и для комбинированных [13].

В исследованном интервале температур (500 — 700°C) лимитирующей стадией формирования паровой фазы является реакция (15), а скорость реакции (13) в несколько раз превышает скорость реакции (14). На рис. 4 изображена типичная расчетная зависимость концентраций реагентов, соответствующая участку I скорости пара-носителя на рис. 3. При такой скорости потока реакция (3) успевает получить достаточное развитие за время движения смеси над источником. На участке II вклад реакций (13) и (14) в формирование паровой фазы незначителен, а на участке III хлористый водород не успевает прореагировать с индием.

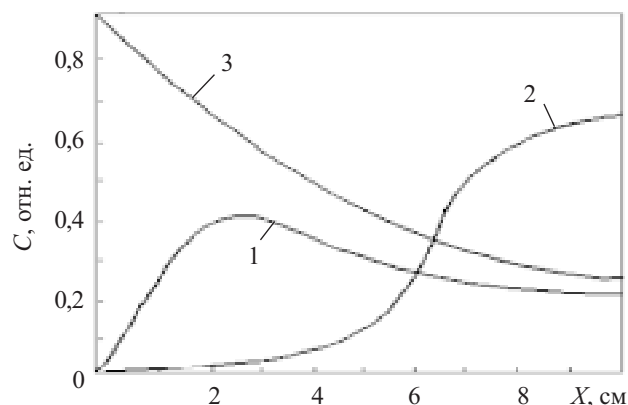


Рис. 4. Зависимость концентрации InCl (1), GaCl (2), HCl (3) от продольной координаты источника ($V_{\text{H}_2}=1$ см/с, $T=620^\circ\text{C}$) [13]

Для создания критического перенасыщения в изотемпературных условиях роста твердых растворов $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ ($T_{\text{источника}}=T_{\text{роста}}$) необходимо выполнение двух условий:

1) отношение концентраций $C_{\text{InCl}}/C_{\text{GaCl}}$ в паровой фазе в зависимости от температуры может изменяться только в интервале 20 — 50 ;

2) должен соблюдаться материальный баланс компонент

$$C_{\text{As}_4} = C_{\text{InCl}} + C_{\text{GaCl}}. \quad (16)$$

Выводы

Проведенные феноменологические исследования позволили построить систему кинетических уравнений для источников In , GaP , Ga , GaAs , обнаружить границу существования разных молекулярных форм. Проведенная оптимизация параметров процесса эпитаксиального осаждения GaAs и твердых растворов $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ и $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ дала возможность предложить

разные технологические варианты формирования, контроля и создания паровой фазы заданного состава, установить чувствительность последней к изменению макропараметров. Полученные данные позволили обосновать возможность создания гетеро- и наноструктур соединений III–V на основе тройных растворов $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ и $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ в прямоточных горизонтальных реакторах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Алферов Ж. И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП.— 1998.— Т. 32, N 1.— С. 3—18
2. Seki H., Koukitu A., Nishisawa J. New methods of vapor phase epitaxial growth of GaAs // Jap. J. Appl. Phys.— 1986.— N 19.— P. 81–88.
3. Губа С. К. Низкотемпературный изотермический метод хлоридной эпитаксии InGaAs // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 1998.— № 2.— С. 40–42.
4. Мильвидский М. Г. Полупроводниковые материалы в современной электронике.— М.: Наука, 1986.
5. Воронин В. А., Голиусов В. А., Чучмарев С. К. Исследование химического равновесия в системах InP-HCl , GaP-HCl // Изв. АН СРСР. Неорганические материалы.— 1983.— Т. 26, №10.— С. 1158–1162.
6. Воронин В. А., Прохоров В. А., Голиусов В. А., Чучмарев С. К. Исследование равновесных характеристик газовой фазы син-

теза полупроводниковых соединений // Электронная техника. Сер. 6. Материалы.— 1984.— Вып. 10.— С. 48–53.

7. Karlicek R. F., A. Blamke. Remote optical monitoring of reactions in vapor phase epitaxial reactor // J. Cryst. Growth.— 1985.— Vol. 73, N 2.— P. 364–369.

8. Губа С. К., Воронин В. А., Рибачук В. Г. Діагностика складу газової фази хлоридних систем методом абсорбційної УФ-спектроскопії // Збірник наукових праць НАНУ. Сер. Фіз. методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів.— 2002.— Вип. № 7.— С. 216–222.

9. Kockes A., Koukitu A., Schonherr E. Growth of GaP doping super-lattices by isothermal vapor phase epitaxy // Crystal Properties and Preparation.— 1991.— Vol. 32–34.— P. 520–525.

10. Guba S. K., Kurilo I. V. Gas-phase formation at the low-temperature isothermal growing of Bi-doped GaAs layers // Functional materials.— 2001.— Vol. 8, N 2.— P. 234–239.

11. Антонов И. И., Губа С. К., Жилиев Ю. В. и др. Кинетика формирования изотермической пересыщенной газовой фазы в системе $\text{GaAs-GaP-AsCl}_3\text{-H}_2$ // Неорганические материалы.— 1993.— Т. 29, № 2.— С. 174–176.

12. Voronin V. O., Guba S. K., Litvin M. O. Precipitation mechanism of the GaAsP/GaAs in the isothermal CVD-method // SPIE.— 1999.— Vol. 3890.— P. 491–496.

13. Voronin V. O., Guba S. K., Litvin M. O. In-kinetics study of gas phase formation in the system $\text{Ga/In-AsCl}_3\text{-HCl-H}_2$ by UV-spectroscopy // SPIE.— 2001.— Vol. 4355.— P. 386–293.

Н. Е. ЖИТНИК, Ю. Л. МИРОПОЛЬСКИЙ, д. ф.-м. н. С. В. ПЛАКСИН,
Л. М. ПОГОРЕЛАЯ, к. ф.-м. н. И. И. СОКОЛОВСКИЙ

Украина, г. Днепродзержинск, Институт транспортных систем
и технологий НАНУ «Трансмаг»
E-mail: plm@westa-inter.com

Дата поступления в редакцию
10.04 2008 г.

Оппонент к. т. н. Б. А. ДЕМЬЯНЧУК
(ОНУ им. И. И. Мечникова, г. Одесса)

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АДАПТИВНОЙ ЗАРЯДКИ ВТОРИЧНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

Предложен набор параметров, необходимых для программирования режима адаптивной зарядки, получаемых методом хронопотенциометрического анализа отклика конкретного источника на импульсное воздействие.

Одним из основных факторов, влияющих на срок эксплуатации химического источника тока (ХИТ), является режим его зарядки. В настоящее время широкое распространение получают нестационарные методы, которые обеспечивают ускоренную зарядку, снижение энергозатрат, уменьшение разогрева ХИТ в процессе зарядки, а следовательно, существенное увеличение срока их службы. Однако при этом возрастает количество контролируемых и регулируемых параметров, по сравнению с традиционными методами зарядки постоянным током.

Наличие широкого набора регулируемых параметров при нестационарных методах проведения зарядки ХИТ импульсными асимметричными реверсивны-

ми токами позволяет использовать различные режимы зарядки и их комбинации, но, как правило, подбор параметров зарядных и деполяризующих импульсов, продолжительности пауз между ними осуществляется эмпирически без полного учета состояния конкретного ХИТ. Задача усложняется при использовании адаптивных методов зарядки, которые все более привлекают внимание разработчиков зарядных устройств, поскольку позволяют производить зарядку ХИТ в наиболее рациональном режиме с учетом особенностей конкретного заряжаемого источника тока. При адаптивной зарядке важным требованием является обеспечение необходимых параметров зарядных импульсов в соответствии с динамикой изменения состояния ХИТ.

Известные методы адаптивной зарядки, например [1], основаны на анализе переходных процессов, происходящих в ХИТ при подаче на него импульса зарядного тока, с использованием эквивалентной схемы, что неприемлемо при практической реализации. Информационные параметры ХИТ, как правило, измеряются в аналоговой форме, затем преобразуются