

АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ПРОГРАММЫ ПОДБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ РОСТА ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ GaAs МЕТОДОМ МОС-ГИДРИДНОЙ ЭПИТАКСИИ

*А.А. Мармалюк, начальник отдела, Д.Е. Арбенин, аспирант,
Е.В. Бурляева, профессор
кафедра Информационные технологии МИТХТ им. М.В. Ломоносова,
* ООО «Сигм Плюс», Москва
e-mail: arbenina@mitht.ru

Разработан алгоритм, позволяющий при известных условиях проведения процесса МОГФЭ (металлоорганическая газофазная эпитаксия) определить характеристики получаемых слоев на основе GaAs и важнейшие технологические параметры процесса эпитаксии с использованием полуэмпирических зависимостей.

Ключевые слова: алгоритм, имитация, МОГФЭ, тренажер, эпитаксия.

Введение

Лидирующее положение в области создания полупроводниковых гетероструктур (ГС) на основе соединений $A^{III}B^V$ и их твердых растворов занимает газофазная эпитаксия с применением металлоорганических соединений (МОС) элементов третьей (A^{III}) и гидридов элементов пятой (B^V) групп – МОС-гидридная ГФЭ. Выращиваемые ГС являются основой для важнейших элементов большинства современных приборов оптоэлектроники и твердотельной электроники. Одно из самых востребованных на настоящий момент полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$ – арсенид галлия (GaAs).

МОС-гидридная эпитаксия обладает следующими преимуществами по сравнению с другими методами эпитаксиальной технологии: гибкие условия для создания гетероперехода с требуемыми характеристиками, высокая чистота и однородность выращиваемых слоев по толщине и по составу, высокие скорость и селективность роста, относительно простая конструкция реактора, высокая производительность, возможный контроль процесса роста *in situ*.

Однако у метода имеется и ряд ограничений: дорогостоящие реагенты и др. расходные материалы, дорогостоящие установки, опасные реагенты, необходимость прецизионного контроля многих параметров процесса (давление и температура в реакционной зоне, расход реагентов и т.д.).

В [1] описана создаваемая компьютерная программная система-тренажер для установки «Сигмос-130», позволяющая в некоторой степени компенсировать влияние ограничивающих факторов. Разработка программы выполнена в связи с существующей необхо-

димостью обучения специалистов и студентов навыкам работы на эпитаксиальном оборудовании. Обучение не на реальной установке, а с помощью компьютерной программы, демонстрирующей основные возможности установки, позволяет не только в достаточной мере подготовить персонал к последующей работе в нормальном режиме, но и, благодаря возможности моделировать нестандартные ситуации и способы выхода из них, минимизировать потери для производства в экстренных случаях. При использовании тренажера в процессе обучения персонал не подвергается воздействию опасных реагентов, не расходуются дорогостоящие материалы и не подвергается износу и риску дорогостоящее оборудование.

Важную роль при проведении современных технологических процессов играет их теоретическое описание. Моделирование процессов и знание закономерностей влияния условий их проведения на характеристики получаемого продукта в значительной мере снижают расход времени и средств на выбор оптимальных режимов, а также позволяют эффективно совершенствовать последние. Однако моделирование технологического процесса, в том числе МОС-гидридной эпитаксии, основанное на термодинамическом и кинетическом расчетах, описании процессов газодинамики, тепло- и массообмена в системе, трудоемко, требует большого количества экспериментальных данных и детального знания механизмов химических реакций [2]. Отличительной особенностью программной системы является примененный в ней подход к имитации процесса эпитаксиального выращивания – без детализации физических и химических механизмов его протекания.

Такой подход позволяет на основе сравнительно простых полуэмпирических зависимостей, выявленных для данной модели установки, получать качественно и количественно верное описание закономерностей влияния технологических параметров процесса на характеристики эпитаксиальных слоев, с высокой точностью выбирать априори режимы выращивания структур разнообразных конструкций и оптимизировать используемые режимы при незначительных временных затратах.

В статье рассматривается алгоритм, реализованный в программной системе и позволяющий определить важнейшие технологические параметры процесса и характеристики выращиваемых эпитаксиальных слоев при известных условиях роста. Алгоритм предполагает выращивание эпитаксиальных слоев (ЭС) на основе GaAs – нелегированных или легированных одной из наиболее распространенных примесей (угле-

родом – С, цинком – Zn, кремнием – Si). На рис. 1 представлена схема установки «Сигмос-130», имеющая место при выращивании ЭС четырех указанных типов.

«Сигмос-130» имеет блочную структуру, включающую камеру подачи и смешения парогазовой смеси, камеру роста (с реакторным отсеком), модуль управления и блок с насосами для создания вакуума. Конструкция кварцевого реактора – горизонтальная; вращение дискообразного подложкодержателя происходит вокруг вертикальной оси. Парогазовые потоки с реагентами вводятся в реактор по центру: газообразные реагенты вводятся самостоятельно (AsH₃ – арсин, CCl₄ – тетрахлорметан, SiH₄ – силан), жидкие (TEGa – триэтилгаллий, DEZn – диэтилцинк) – захватываются отдельным потоком газа-носителя (высокоочищенный H₂); из реактора поток газа-носителя с остатками реагентов выходит по боковым каналам.

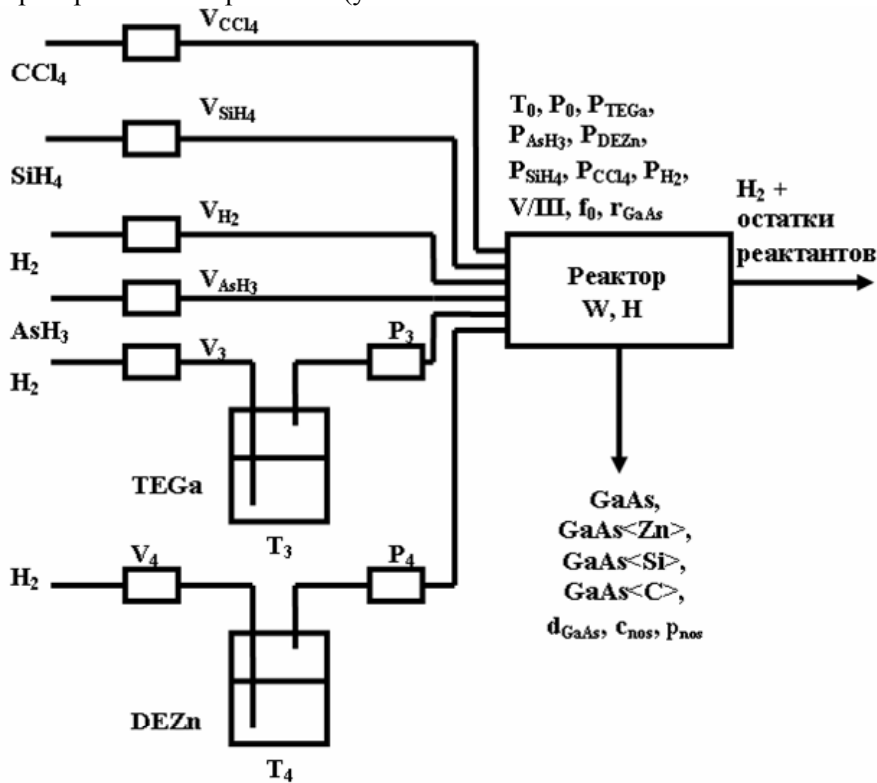


Рис. 1. Схема установки для выращивания ЭС методом МОГФЭ.

Входные параметры процесса задаются до начала процесса выращивания, в алгоритме учтены: давление (P_0) и температура (T_0) в реакторе, температуры в испарителях (T_3 , T_4) и давления в подводящих ветках (P_3 , P_4), объемные расходы веществ (V_{AsH_3} , V_{SiH_4} , V_{CCl_4} ; V_{H_2} – основной поток газа-носителя; V_3 , V_4 – потоки H₂, предназначенного для переноса соответствующих реагентов), размеры реакционной камеры (W , H – ширина и высота), время роста слоя (t). От входных параметров зависят ожидаемые рабочие

параметры процесса, к которым относятся: скорость роста эпитаксиального слоя (r_{GaAs}), объемные расходы TEGa (V_{TEGa}) и DEZn (V_{DEZn}), отношение V/III (отношение парциальных давлений соединений-поставщиков элементов V и III групп) в газовой фазе, скорость парогазовой смеси в реакторе (f_0), парциальные давления (P_i), мольные расходы (n_i) и мольные доли (x_i) веществ в парогазовой фазе. Характеристики выращенных ЭС (или выходные параметры процесса) находятся в зависимости от входных и

рабочих параметров: толщина слоя (d_{GaAs}), концентрация (c_{car}) и подвижность (p_{car}) носителей заряда в ЭС.

Результаты

Часто используемые режимы выращивания слоев заранее обработаны и введены в

память управляющего компьютера в виде таблиц. Работа при других режимах предполагает заблаговременный поиск необходимых входных параметров в соответствии с требуемыми выходными по следующему алгоритму действий (рис. 2).

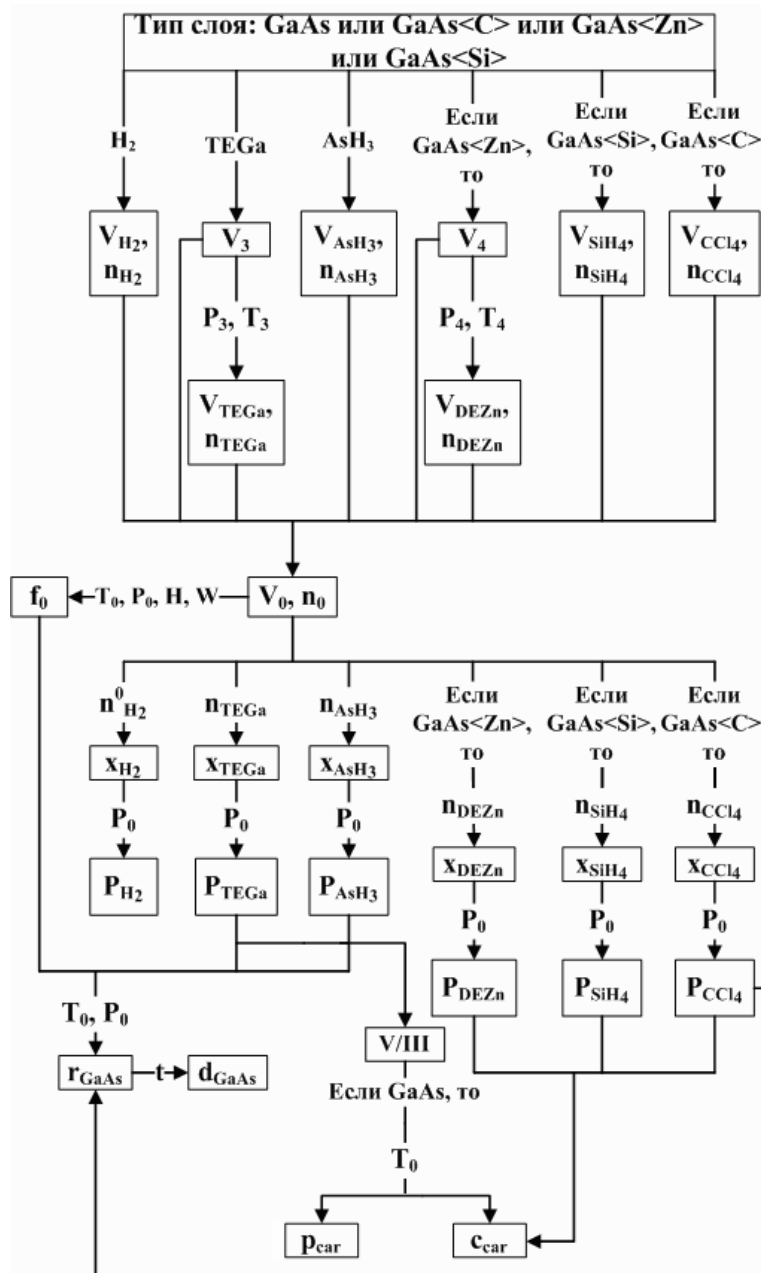


Рис. 2. Алгоритм действий по прогнозированию рабочих и выходных параметров процесса МОГФЭ на основе входных параметров.

План выполнения расчетов следующий:

1) Задаются исходные параметры процесса $T_0, T_3, T_4, P_0, P_3, P_4, V_{AsH_3}, V_{SiH_4}, V_{CCl_4}, V_{H_2}, V_3, V_4, W, H, t$. Для всех параметров, кроме t, W и H , определены оптимальные промежутки варьирования: $V_{H_2}=10-30, V_{AsH_3}=0.3-1.0, V_3=0.1-0.5, V_{CCl_4}=0.01-0.1, V_{SiH_4}=0.01-0.1, V_4=0.01-0.2$ (л/мин); $P_0=50-150, P_3=400-1000, P_4=400-1000$ (мбар), $T_3=10-20, T_4=10-20, T_0=600-770$ (°C). Размеры реактора являются конструктивными особенностями установки $W=0.15, H=0.015$

(м), время t , (с) зависит от назначения конкретной структуры.

2) Расход TEGa вычисляется по экспериментальной зависимости:

$$V_{TEGa} = \frac{V_3 \cdot 1.333 \cdot 10^{(8.083 - \frac{2162}{T_3})}}{P_3}, \quad (1)$$

где V_{TEGa} – (л/мин), V_3 – (л/мин), T_3 – (К), P_3 – (Па); постоянные величины в данной и последующих зависимостях, где такие величины имеют место и не оговорено

противного, определены из статистической обработки экспериментальных данных.

3) Если вводится примесь Zn, то расход DEZn вычисляется по экспериментальной зависимости:

$$V_{DEZn} = \frac{V_4 \cdot 1.333 \cdot 10^{(8.280 - \frac{2109}{T_4})}}{P_4}, \quad (2)$$

где V_{DEZn} – (л/мин), V_4 – (л/мин), T_4 – (К), P_4 – (Па).

4) Суммарный поток газа-носителя через реактор:

$$V_{H_2}^0 = \sum V_{H_2}^i, \quad (3)$$

где $V_{H_2}^0$ – суммарный объемный расход газа-носителя (л/мин), $V_{H_2}^i$ – объемный расход газа-носителя в каждой из веток, где он используется (л/мин); при выращивании нелегированного GaAs, легированного Si и C $V_{H_2}^i$: V_{H_2} , V_3 ; при выращивании легированного Zn $V_{H_2}^i$: V_{H_2} , V_3 , V_4 .

5) Суммарный поток парогазовой смеси через реактор:

$$V_0 = \sum V_i, \quad (4)$$

где V_0 – (л/мин), V_i – объемный расход каждого из веществ (л/мин); при выращивании нелегированного GaAs V_i : V_{TEGa} , V_{AsH_3} , $V_{H_2}^0$; при выращивании легированного Si V_i : V_{TEGa} , V_{AsH_3} , $V_{H_2}^0$, V_{SiH_4} ; при выращивании легированного C V_i : V_{TEGa} , V_{AsH_3} , $V_{H_2}^0$, V_{CCl_4} ; при выращивании легированного Zn V_i : V_{TEGa} , V_{AsH_3} , $V_{H_2}^0$, V_{DEZn} .

6) Мольный расход каждого из веществ в парогазовой смеси:

$$n_i = \frac{V_i}{22.4}, \quad (5)$$

где n_i – (моль/мин), V_i – объемный расход каждого из веществ (л/мин); при выращивании нелегированного GaAs V_i : V_{TEGa} , V_{AsH_3} , $V_{H_2}^0$, n_i : n_{TEGa} , n_{AsH_3} , n_{H_2} ; при выращивании легированного Si V_i : V_{TEGa} , V_{AsH_3} , $V_{H_2}^0$, V_{SiH_4} , n_i : n_{TEGa} , n_{AsH_3} , n_{H_2} , n_{SiH_4} ; при выращивании легированного C V_i : V_{TEGa} , V_{AsH_3} , $V_{H_2}^0$, V_{CCl_4} , n_i : n_{TEGa} , n_{AsH_3} , n_{H_2} , n_{CCl_4} ; при выращивании легированного Zn V_i : V_{TEGa} , V_{AsH_3} , $V_{H_2}^0$, V_{DEZn} , n_i : n_{TEGa} , n_{AsH_3} , n_{H_2} , n_{DEZn} ; сделано допущение об объеме одного моля 22.4 л, приемлемое в условиях процесса.

7) Суммарный мольный поток парогазовой смеси через реактор:

$$n_0 = \sum n_i, \quad (6)$$

где n_0 – (моль/мин), n_i – мольный расход каждого из веществ (моль/мин); при выращивании нелегированного GaAs n_i : n_{TEGa} , n_{AsH_3} , n_{H_2} ; при выращивании легированного Si

n_i : n_{TEGa} , n_{AsH_3} , n_{H_2} , n_{SiH_4} ; при выращивании легированного C n_i : n_{TEGa} , n_{AsH_3} , n_{H_2} , n_{CCl_4} ; при выращивании легированного Zn n_i : n_{TEGa} , n_{AsH_3} , n_{H_2} , n_{DEZn} .

8) Мольные доли каждого из веществ в парогазовой смеси:

$$x_i = n_i/n_0, \quad (7)$$

где x_i – (мол.дол), n_0 – суммарный мольный расход всех веществ (моль/мин), n_i – мольный расход каждого из веществ (моль/мин); при выращивании нелегированного GaAs x_i : x_{TEGa} , x_{AsH_3} , x_{H_2} , n_i : n_{TEGa} , n_{AsH_3} , n_{H_2} ; при выращивании легированного Si x_i : x_{TEGa} , x_{AsH_3} , x_{H_2} , x_{SiH_4} , n_i : n_{TEGa} , n_{AsH_3} , n_{H_2} , n_{SiH_4} ; при выращивании легированного C x_i : x_{TEGa} , x_{AsH_3} , x_{H_2} , x_{CCl_4} , n_i : n_{TEGa} , n_{AsH_3} , n_{H_2} , n_{CCl_4} ; при выращивании легированного Zn x_i : x_{TEGa} , x_{AsH_3} , x_{H_2} , x_{DEZn} , n_i : n_{TEGa} , n_{AsH_3} , n_{H_2} , n_{DEZn} .

9) Парциальные давления каждого из веществ парогазовой смеси в реакторе:

$$P_i = x_i \cdot P_0, \quad (8)$$

где x_i – мольная доля каждого из веществ (мол.дол), P_0 – общее давление в реакторе (Па), P_i – (Па); при выращивании нелегированного GaAs x_i : x_{TEGa} , x_{AsH_3} , x_{H_2} , P_i : P_{TEGa} , P_{AsH_3} , P_{H_2} ; при выращивании легированного Si x_i : x_{TEGa} , x_{AsH_3} , x_{H_2} , x_{SiH_4} , P_i : P_{TEGa} , P_{AsH_3} , P_{H_2} , P_{SiH_4} ; при выращивании легированного C x_i : x_{TEGa} , x_{AsH_3} , x_{H_2} , x_{CCl_4} , P_i : P_{TEGa} , P_{AsH_3} , P_{H_2} , P_{CCl_4} ; при выращивании легированного Zn x_i : x_{TEGa} , x_{AsH_3} , x_{H_2} , x_{DEZn} , P_i : P_{TEGa} , P_{AsH_3} , P_{H_2} , P_{DEZn} .

10) Отношение V/III в парогазовой смеси:

$$V/III = P_{AsH_3}/P_{TEGa}, \quad (9)$$

где P_{AsH_3} – (Па), P_{TEGa} – (Па).

11) Скорость парогазовой смеси в реакторе при условиях проведения процесса роста определяется на основе экспериментальной зависимости:

$$f_0 = \frac{V_0 \cdot T_0}{60 \cdot H \cdot W \cdot 273 \cdot P_0}, \quad (10)$$

где f_0 – (м/с), V_0 – (л/мин), T_0 – (К), P_0 – (Па), H – м, W – м; 273 – температура при стандартных условиях, К; 60 – коэффициент перехода к системе единиц СИ.

12) Скорость роста эпитаксиального слоя определяется на основе экспериментальных зависимостей: во-первых, без учета скорости парогазовой смеси в реакторе [3]:

$$r_{GaAs_1} = 2.8 \cdot P_{TEGa}^{0.99} \cdot P_{AsH_3}^{0.06} \cdot \left(\frac{T_0}{298}\right)^{1.8}, \quad (11)$$

где r_{GaAs_1} – скорость роста по первому варианту (нм/мин), T_0 – (К), P_{AsH_3} – (Па), P_{TEGa} – (Па), 298 – температура при нормальных

условиях, К;

13) и корректировкой по скорости парогазовой смеси и общему давлению в реакторе:

$$r_{\text{GaAs}_1\text{ed}} = r_{\text{GaAs}_1} \cdot \left(\frac{f_0 \cdot P_{*0}}{P_0 \cdot f_{*0}} \right)^{1/2}, \quad (12)$$

где $r_{\text{GaAs}_1\text{ed}}$ – скорость роста по первому варианту с корректировкой (нм/мин), r_{GaAs_1} – (нм/мин), f_0 – (м/с) и P_0 – (Па) – действительные параметры состояния в реакторе, $f_{*0} = 8.464$ (м/с) и $P_{*0} = 7874$ (Па) – стандартные параметры состояния в реакторе, при которых была получена зависимость (11);

14) во-вторых, с учетом скорости парогазовой смеси, но без явного учета температуры роста и давления AsH_3 [3]:

$$r_{\text{GaAs}_2} = 1000 \cdot P_{\text{TEGa}} \cdot (f_0/P_0)^{1/2}, \quad (13)$$

где r_{GaAs_2} – скорость роста по второму варианту (нм/мин), f_0 – (м/с), P_0 – (Па), P_{TEGa} – (Па), 1000 – коэффициент пересчета давления из мбар в Па;

15) и корректировкой по температуре роста в реакторе:

$$r_{\text{GaAs}_2\text{ed}} = r_{\text{GaAs}_2} \cdot (T_0/T_{*0})^{1/2}, \quad (14)$$

где $r_{\text{GaAs}_2\text{ed}}$ – скорость роста по второму варианту с корректировкой (нм/мин), r_{GaAs_2} – (нм/мин), T_0 – (К) действительная средняя температура в реакторе, $T_{*0} = 1023$ (К) – стандартная средняя температура в реакторе, при которой получена зависимость (13);

16) усредненное значение скорости роста определяется из уравнения:

$$r_{\text{GaAs}} = (r_{\text{GaAs}_1\text{ed}} + r_{\text{GaAs}_2\text{ed}})/2, \quad (15)$$

где r_{GaAs} – усредненная по двум вариантам расчета скорость роста слоя (нм/мин), $r_{\text{GaAs}_2\text{ed}}$ – скорость роста по второму варианту с корректировкой (нм/мин), $r_{\text{GaAs}_1\text{ed}}$ – скорость роста по первому варианту с корректировкой (нм/мин).

17) Процесс легирования GaAs углеродом осложняется протеканием побочных реакций травления (т.к. в качестве соединения-поставщика атомов С выступает CCl_4); в этом случае определение скорости роста слоев

$$p_{\text{car}} = p_0 \cdot \left(1 + \left(\frac{T_0}{T_{0(1)}}\right)^{-a}\right)^{-b} \cdot \left(1 + \left(\frac{T_0}{T_{0(2)}}\right)^{a_1}\right)^{-b_1} \cdot \left(1 + \left(\frac{P_{\text{AsH}_3}}{P_{\text{AsH}_3(1)}}\right)^{-a_2}\right)^{-b_2}, \quad (19)$$

где p_{car} – подвижность носителей заряда в слое, ($\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$); T_0 (К); $p_0 = 7188$, $T_{0(1)} = 900.0$, $T_{0(2)} = 1275$, $a = 300.0$, $b = 0.007260$, $a_1 = 10.20$, $b_1 = 3.870$, $P_{\text{AsH}_3(1)} = 220.0$, $a_2 = 13.20$, $b_2 = 0.001520$ – постоянные коэффициенты уравнения, полученные путем обработки экспериментальных данных [3] в

$$c_{\text{car}} = K_X \cdot P_X^{y_X} \cdot P_{\text{TEGa}}^{a_X} \cdot P_{\text{AsH}_3}^{b_X} \cdot \exp\left(\frac{E_X}{k_b \cdot T_0}\right), \quad (20)$$

осуществляется на основе соотношения (15) за вычетом компоненты, определяемой травлением [4]:

$$r_{e(\text{GaAs})} = k_e \cdot n_{\text{CCl}_4}^{a_e} \cdot r_{\text{GaAs}}^{b_e} \times n_{\text{AsH}_3}^{c_e} \cdot \exp\left(\frac{E_{a_e}}{k_b \cdot T_0}\right), \quad (16)$$

где r_{GaAs} – скорость роста GaAs, нм/мин; $r_{e(\text{GaAs})}$ – снижение скорости роста за счет травления, нм/мин; n_{CCl_4} , n_{AsH_3} – мольные расходы четыреххлористого углерода и арсина, соответственно, мкмоль/мин; k_e , a_e , b_e , c_e , E_{a_e} – константы (экспериментально определены значения, соответственно: 1150, 0.42, 1, -0.05, 0.77); k_b – константа Больцмана.

18) Толщина выращиваемого эпитаксиального слоя:

$$d_{\text{GaAs}} = r_{\text{GaAs}} \cdot t, \quad (17)$$

где d_{GaAs} – (нм); t – (мин); r_{GaAs} – усредненная по двум вариантам расчета скорость роста слоя (нм/мин).

19) Фоновая концентрация носителей заряда, при выращивании нелегированного эпитаксиального слоя GaAs может быть определена на основе функциональной зависимости

$$c_{\text{car}} = c_0 \cdot \left(1 + \left(\frac{T_0}{T_{0(1)}}\right)^{-a}\right)^b \times \left(1 + \left(\frac{T_0}{T_{0(2)}}\right)^{a_1}\right)^{b_1} \cdot \left(1 + \left(\frac{1 + P_{\text{AsH}_3}}{P_{\text{AsH}_3(1)}}\right)^{-a_2}\right)^{b_2}, \quad (18)$$

где c_{car} – концентрация носителей заряда в слое, (см^{-3}); T_0 (К); $c_0 = 5.140 \cdot 10^{14}$, $T_{0(1)} = 856.0$, $T_{0(2)} = 973.0$, $a = 92.80$, $b = 0.05950$, $a_1 = 64.80$, $b_1 = 0.2130$, $P_{\text{AsH}_3(1)} = 15.00$, $a_2 = 1.500$, $b_2 = 0.4840$ – постоянные коэффициенты уравнения, полученные из обработки экспериментальных данных [3] в программном пакете Microsoft Excel.

20) Подвижность носителей заряда, при выращивании нелегированного эпитаксиального слоя GaAs может быть определена на основе функциональной зависимости:

программном пакете Microsoft Excel..

21) Концентрация носителей заряда при использовании легирующих примесей (в предположении равенства концентраций носителей заряда и атомов легирующей примеси) определяется по экспериментальной зависимости [4]:

где c_{car} – концентрация атомов легирующей примеси в эпитаксиальном слое ($см^{-3}$); P_{AsH_3} – (Па), P_{TEGa} – (Па); P_X – парциальное давление лигатуры, возможные значения P_X : P_{SiH_4} , P_{DEZn} , P_{CCl_4} ; k_b – константа Больцмана; T_0 , (К) – абсолютная средняя температура роста; энергия активации внедрения примеси E_X , константа K_X и показатели степени (a_X , b_X , u_X) зависят от используемой примеси и представлены в таблице (1):

Таблица 1. Постоянные величины в уравнении для расчета концентрации легирующей примеси в ЭС GaAs.

Примесь	K_X	a_X	b_X	u_X	E_X , эВ
Si	$9.6 \cdot 10^{25}$	-0.4	-0.02	0.9	-1.4
Zn	$1.3 \cdot 10^6$	0.002	0.5	1.1	2.4
C	$2.7 \cdot 10^8$	3.9	-0.2	0.6	2.1

Проверка адекватности описания предлагаемыми моделями экспериментальных данных может быть оценена на основе следующих графических зависимостей:

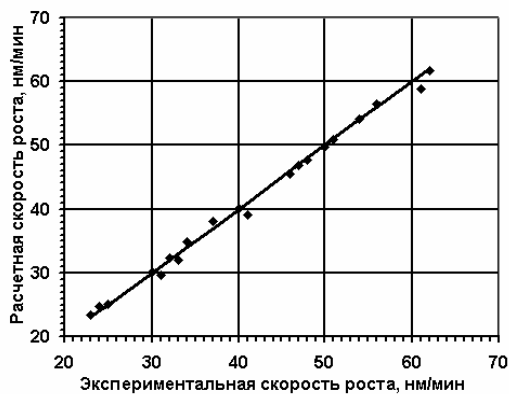


Рис. 3. Сравнение расчетных значений скорости роста эпитаксиальных слоев на основе GaAs с экспериментальными значениями скорости роста.

Совпадение экспериментальных и расчетных значений одной и той же величины отражает биссектриса прямого угла. Точками отмечены смещения, вызванные приближением моделей. Каждая точка на графиках получена при различных условиях, однако обе составляющие отдельной точки –

расчетная и экспериментальная – получены при одинаковых условиях. Точность определения экспериментальных величин составляет 5%, адекватность моделей подтверждается вхождением расчетных точек в диапазон погрешности измерений. Такой вариант проверки использован в связи с влиянием на исследуемые величины большого числа факторов и, соответственно, возникновением затруднений при оценке другими методами.

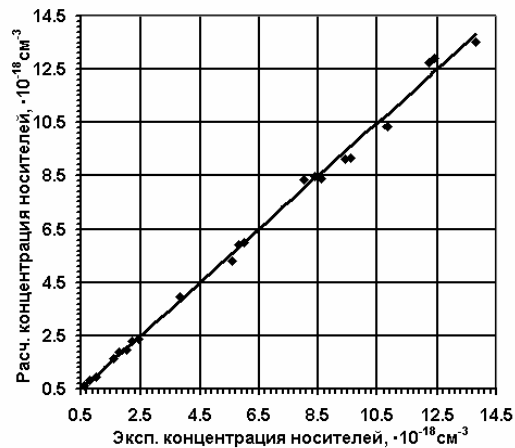


Рис. 4. Сравнение расчетных значений концентрации носителей заряда в легированных слоях GaAs с экспериментальными значениями концентрации носителей заряда.

Сравнение полученных моделей с используемыми в [2] позволяет сделать вывод о значительно большей простоте первых, что в совокупности с положительными результатами проверки адекватности позволяет сделать заключение о достижении поставленных при разработке алгоритма целей.

Выводы

Разработан алгоритм, позволяющий при известных условиях проведения процесса выращивания определить характеристики получаемых слоев на основе GaAs и важнейшие технологические параметры процесса МОС-гидридной эпитаксии с использованием относительно простых полуэмпирических зависимостей. Проверена адекватность важнейших зависимостей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бурляева, Е. В. Создание программного комплекса на базе имитационного моделирования процесса МОС-гидридной эпитаксии полупроводниковых структур / Е. В. Бурляева, Д. Е. Арбенкин // Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров : сб. статей Юбилейной Междунар. научно-практической конф., Пенза, Россия, 22–24 мая 2007. – Пенза, 2007. – С. 106–108.
2. www.Aixtron.com. Growth of nitride films.
3. Мармалюк, А. А. Получение GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии / А. А. Мармалюк // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2004. – № 4. – С. 21–26.
4. Мармалюк, А. А. Легирование GaAs в условиях МОС-гидридной эпитаксии / А. А. Мармалюк // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2004. – № 3. – С. 14–19.