

Рис. 3. Форма бегущего «холодного» импульса в пространстве

Численное моделирование процессов формирования и распространения бегущего импульса проводилось методом конечных разностей по неявной схеме Эйлера или схеме Кранка — Никольсона. Нами было обнаружено

устойчивое распространение области пониженной концентрации носителей — «холодный» импульс (рис. 3). При инициации «горячего» импульса он формировался и исчезал на расстояниях порядка  $10L_N$ .

Как отмечено выше, для существования устойчивого импульса необходимо условие  $L_N \gg L_T$ , как правило, выполненное в реальной ситуации. Однако введением дополнительных примесей в полупроводник подвижность носителей может быть уменьшена, и в этом случае реализуемо также обратное соотношение —  $L_N \ll L_T$ . При этом возможно возникновение принципиально иных пространственно-неоднородных решений — статических расслоений кинетических переменных (см., например, в [7]), наличие которых в бистабильных интерферометрах предсказано нами в [4].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. McCall S. L. Instability and regenerative pulsation phenomena in Fabry — Perot nonlinear optic media devices // Appl. Phys. Lett.— 1978.— V. 32.— P. 284.
2. Jewell J. L., Gibbs H. M., Tarnag S. S. e. a. Regenerative pulsations from an intrinsic bistable optical device // Appl. Phys. Lett.— 1982.— V. 40.— P. 291.
3. Fazekas P. Laser-induced phase transition in amorphous GeSe<sub>2</sub> films // Phil. Mag. B.— 1981.— V. 44.— P. 435.
4. Балкарей Ю. И., Григорьянц А. В., Ржанов Ю. А. Автоколебания, поперечная диффузионная неустойчивость и пространственные диссипативные структуры при оптической бистабильности и мультистабильности // Квантовая электрон.— 1987.— Т. 14, № 1.
5. Miller D. A. B., Smith S. D., Seaton C. T. Optical bistability in semiconductors // IEEE J. Quantum Electron.— 1981.— V. QE-17.— P. 312.
6. Gear C. W. Algorithm 407, DIFSUB for solution of ordinary differential equations // Commun. Ass. Comp. Mach.— 1971.— V. 14.— P. 185.
7. Васильев В. А., Романовский Ю. М., Яхно В. Г. Автоволновые процессы в распределенных кинетических системах // УФН.— 1979.— Т. 128, № 4.

Поступила в редакцию 5 января 1987 г.

УДК 621.382.002

А. И. ЖМАКИН, О. В. КОВАЛЕНКОВ, А. И. КУЗЬМИН,  
Ю. Н. МАКАРОВ, А. А. ФУРСЕНКО, Б. С. ЯВИЧ

(Ленинград)

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССА СМЕНЫ СОСТАВА ГАЗОВОЙ СМЕСИ В ЭПИТАКСИАЛЬНОМ РЕАКТОРЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПА

Известно, что с помощью метода газофазной эпитаксии с использованием металлоорганических соединений и гидридов (МОС-гидридный метод) возможно получение гетероструктур на основе соединений  $A^{III}B^V$

с заданным изменением состава в области гетероперехода [1, 2]. Обычно процесс выращивания таких структур осуществляется в режимах, в которых скорость роста лимитируется массопереносом МОС к подложке (так называемый диффузионный режим роста). Вследствие этого характер и особенности течения газовой смеси в объеме реактора определяют однородность слоев по толщине и составу при получении эпитаксиальных слоев твердых растворов, а также ширину переходных областей при формировании гетеропереходов [3, 4].

Ранее было показано [5, 6], что в рассматриваемом реакторе вертикального типа с горизонтальным расположением подложек изменение состава газовой смеси определяется газодинамикой течения. Настоящая работа содержит новые результаты экспериментального исследования и численного моделирования процессов в объеме реактора при ступенчатом изменении состава газовой смеси на его входе. Проведенные исследования охватывают интервал объемных расходов, обычно используемых при выращивании эпитаксиальных слоев.

Индикатором состояния газовой смеси служил метан, добавляемый в газ-носитель [7]. В наших условиях метан — химически инертное и неадсорбируемое соединение, поэтому вариации его концентрации отражают нестационарные процессы в объеме реактора. Концентрация метана измерялась малоинерционным и высокочувствительным пламенно-ионизационным детектором.

На рис. 1 приведены зависимости концентрации метана в смеси  $H_2 + CH_4$  от времени на оси реактора у поверхности подложкодержателя, снятые при расходах смеси 6, 3.2, 2., 1 л/мин (кривые 1—4 соответственно). Эксперименты проведены при температуре подложкодержателя 300 К. Видно, что участок нестационарного изменения концентрации у подложкодержателя возрастает с уменьшением расхода смеси. На вставке к рис. 1 показана зависимость времени переходного процесса ( $\Delta t$ ) у поверхности подложкодержателя, соответствующая концентрации от 0,9 до 0,1  $C_0$  ( $C_0$  — концентрация  $CH_4$  на входе в реактор). В зависимости от величины объемного расхода выявляются два существенно различных механизма смены состава газовой смеси.

Дополнительная информация об этих механизмах получена при численном моделировании газодинамики течения и массопереноса в объеме реактора. Математическая модель и численные методы, использованные в данной работе, описаны в [5].

Проведенное ранее в [6] сопоставление расчетных и экспериментальных зависимостей изменения концентрации метана от времени продемонстрировало возможность адекватного описания процессов смены состава газовой смеси в реакторе в рамках используемых моделей. На рис. 1 треугольниками помечена расчетная зависимость, соответствующая экспериментальной кривой 2.

Изолинии функции тока течений газовой смеси в реакторе при расходах 1., 2., 4., 6 л/мин показаны на рис. 2, а — г соответственно. Видно, что при малых расходах реализуется плавное безотрывное течение в расширяющейся части реактора (см. рис. 2, а). При больших расходах (см. рис. 2, г) течение в реакторе состоит из центральной струи, обтекающей подложкодержатель, и интенсивного вихря, занимающего значительную часть объема.

Качественно различный характер течения в указанных выше режимах определяет и существенно разные механизмы смены состава газо-

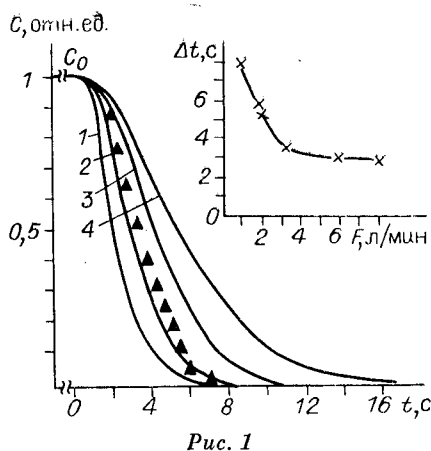


Рис. 1

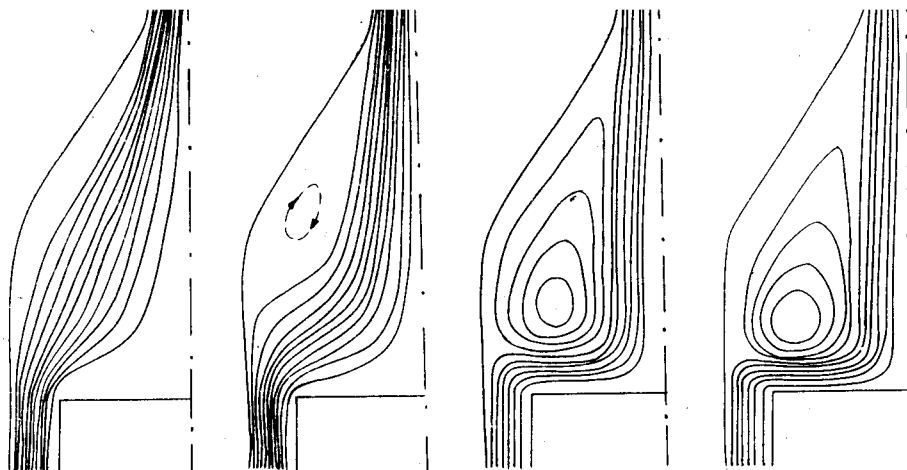


Рис. 2

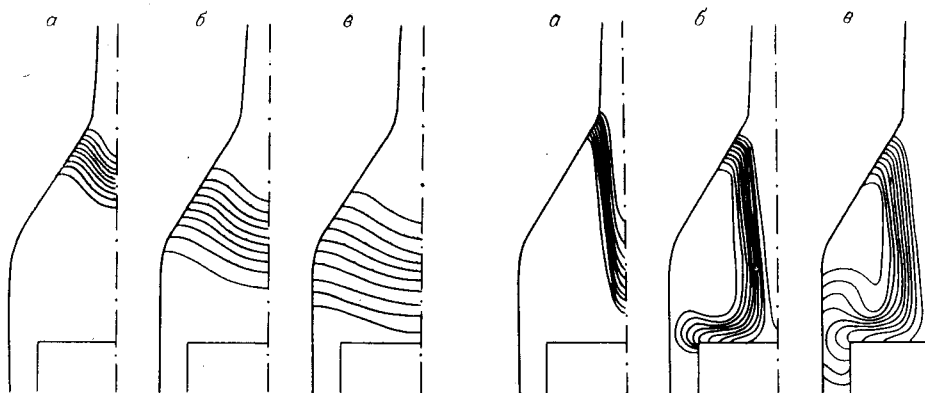


Рис. 3

Рис. 4

вой смеси. На рис. 3, а — в, 4, а — в приведены изолинии концентрации метана в моменты времени 3, 10 и 20  $\tau$  ( $\tau$  — характерное «пролетное» время:  $\tau = R/V_0$ , где  $R$  — радиус реактора;  $V_0$  — скорость газа на его входе), иллюстрирующие процесс удаления метана из объема реактора после резкого прекращения его подачи. В первом режиме (расход  $F = 1$  л/мин) происходит плавное вытеснение газовой смеси вместе с метаном из объема реактора с одновременным размытием фронта за счет диффузии. Во втором режиме ( $F = 6$  л/мин) струя свободного от метана газа из входного отверстия достаточно быстро достигает подложкодержателя и сменяет газовую смесь у его поверхности, однако в интенсивном вихре в объеме реактора запасено еще значительное количество метана, удаляемого из вихря за большие диффузионные времена.

Таким образом, с помощью экспериментов с использованием газовой смеси  $H_2 + CH_4$  и численного моделирования установлены времена переходных процессов при ступенчатом изменении состава на входе в реактор. Из результатов натуральных и численных экспериментов следует, в частности, что эти процессы не могут быть описаны с помощью моделей реактора идеального перемешивания.

- by MOCVD compositional grading // "Electron. Lett.—1982.— V. 18, N 20.— P. 888.
3. Жмакин А. И., Ипатова И. П., Макаров Ю. Н. и др. Исследование факторов, определяющих однородность толщины эпитаксиальных слоев GaAs в системе  $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3 - \text{AsH}_3 - \text{H}_2$  // Письма в ЖТФ.— 1986.— Т. 12, № 8.
  4. Бер Б. Я., Кадинский Л. А., Сеницын М. А. и др. Анализ нестационарных явлений в объеме реактора в процессе выращивания GaAs—AlGaAs структур с резкими переходами МОС-гидридным методом // ЖТФ.— 1986.— Т. 56, № 2.
  5. Жмакин А. И., Ипатова И. П., Макаров Ю. Н. Численное моделирование процессов в проточных газозэпитаксиальных реакторах. I. Газодинамические процессы // Там же, № 9.
  6. Жмакин А. И., Коваленков О. В., Макаров Ю. Н. и др. Газодинамические аспекты формирования резких переходов при выращивании структур МОС-гидридным методом // Тр. IV Всесоюз. конф. по физическим процессам в полупроводниковых гетероструктурах.— Минск, 1986.— Ч. 1.
  7. Коваленков О. В., Явич Б. С. Применение плазменно-ионизационного детектора для анализа газовой фазы в системах с металлоорганическими соединениями // Тр. III Всесоюз. конф. по процессам роста и синтеза полупроводниковых кристаллов и пленок.— Новосибирск, 1986.— Ч. 1.

*Поступила в редакцию 22 марта 1988 г.*