

УДК 658.0.12.011.56.004.14:0/9

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПЛЕНОК ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЕМ

Г. В. Абрамов, Е. А. Бородина

*Воронежский государственный университет инженерных технологий;  
Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 13.06.2016 г.

**Аннотация.** Исследуется процесс формирования тонких пленок центрифугированием. При подаче жидкости на вращающуюся подложку и распределении по поверхности изделия от жидкости отрываются капли. В дальнейшем эти капли осаждаются на поверхности покрытия, образуя дефекты. Для повышения эффективности процесса необходимо провести исследование факторов, вызывающих образование капель. Сложность данного процесса заключается в его быстротечности и малой толщине покрытия. Для детального изучения необходимо математическое моделирование. Разработана математическая модель слоистого течения жидкости, которая позволяет рассчитывать условия образования капель над получаемым покрытием. По результатам моделирования возможно провести оценку влияния технологических параметров на нарушение неразрывности пленочного течения.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, центрифугирование, тонкие пленки, фотолитография, брызги, слоистое течение.

## THE STUDY OF DEFECTS AT THE FILM FORMATION BY CENTRIFUGATION

G. V. Abramov, E. A. Borodina

**Abstract.** The process of forming thin films by centrifugation is investigated. When the liquid is fed to the rotating substrate and distributed over the surface of the product from the liquid drops. In the future, these drops are deposited on the surface of the coating, forming defects. To improve the efficiency of the process, it is necessary to conduct a study of the factors that cause the formation of drops. The complexity of this process is its fleeting and small thickness of the coating. For a detailed study of the necessary mathematical modeling. A mathematical model of layered fluid flow is developed, which allows calculating the conditions of droplet formation over the resulting coating. Based on the simulation results, it is possible to assess the influence of technological parameters on the film flow continuity violation.

**Keywords:** mathematical modeling, centrifugation, thin films, photolithography, splashes, layered flow.

## ВВЕДЕНИЕ

Планарная технология изготовления изделий силовой микро- и оптоэлектроники, основанная на использовании фотолитографических процессов формирования изображения, является многостадийной и высокоточной. Получение рисунка схемы традиционными методами идет путем чередования многих производственных стадий, что является источником технологических потерь. Любое совершенствование технологии, либо сокращение числа фотолитографических стадий может существенно повысить процент выхода годных изделий.

Пленочное течение жидкости по поверхности вращающегося диска встречается в ряде технологических процессов микроэлектроники. Основной задачей при этом является получение тонкого равномерного покрытия. Однако при подаче жидкости на вращающуюся подложку и распределении по поверхности изделия от жидкости отрываются капли. В дальнейшем эти капли осаждаются на поверхности покрытия, образуя дефекты. Для повышения эффективности процесса необходимо провести исследование факторов, вызывающих образование капель. Сложность исследования данного процесса заключается в его быстротечности и малой толщине покрытия. Для детального изучения процесса необходимо математическое моделирование [1, 2].

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной работе рассматривается следующий механизм образования капель: при покрытии пластины жидкость образует многослойное течение, при этом, так как верхние слои имеют более высокие компоненты скорости, чем слои ниже, то в момент равенства радиусов верхнего слоя и нижнего возможно образование капель, диаметр которых равен высоте верхнего слоя.

Отрыв капель происходит в случае, если кинетическая энергия капли превышает энергию сил поверхностного натяжения [3].

При моделировании считалось, что каждый слой жидкости имеет форму цилиндра, жидкость несжимаема, толщина слоя значительно меньше радиуса его растекания, течение осесимметричное, внезапные ускорения отсутствуют, действием массовых сил можно пренебречь [4]. При этом рассматривается двухслойное течение жидкости.

В начале процесса течет только один слой (нижний). Затем начинает формироваться верхний слой (также в виде цилиндра), который течет по поверхности нижнего. В момент времени, когда радиус

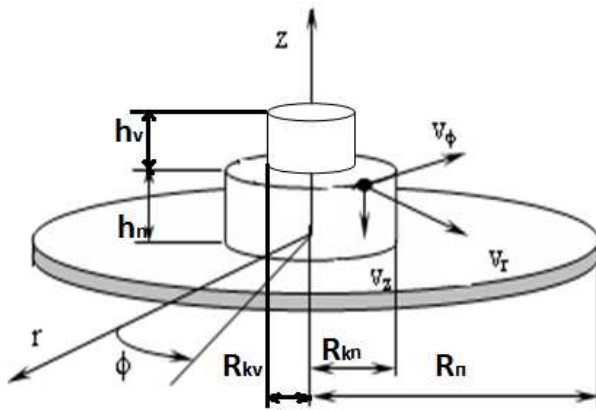


Рис. 1. Расчётная схема:  $r, \phi, z$  — цилиндрические координаты;  $R_n, R_{kn}, R_{kv}$  — радиус пластины, радиус нижней капли и радиус верхней капли;  $h_n, h_v$  — высота нижней и верхней капли соответственно;  $v_r, v_\phi, v_z$  — компоненты скорости.

ус верхнего слоя сравнивается с радиусом нижнего слоя, они объединяются (новый нижний слой) и начинает формироваться новый верхний слой и т. д.

Расчетная схема установки для формирования покрытий представлена на рис. 1.

Для каждого слоя математическая модель включает уравнения движения, баланса масс и кинематическое условие, записанные в относительных цилиндрических координатах, свя-

занных с осью вращения и верхней поверхностью пластины (1)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v_{rn}}{\partial t} + v_{rn} \cdot \frac{\partial v_{rn}}{\partial r} - \frac{v_{\varphi n}^2}{r} + v_{zn} \cdot \frac{\partial v_{rn}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \cdot \frac{\partial^2 v_{rn}}{\partial z^2} + 2 \cdot v_{\varphi n} \cdot \omega + r \cdot \omega^2, \\ \frac{\partial v_{\varphi n}}{\partial t} + v_{rn} \cdot \frac{\partial v_{\varphi n}}{\partial r} + \frac{v_{rn} \cdot v_{\varphi n}}{r} + v_{zn} \cdot \frac{\partial v_{\varphi n}}{\partial z} = \nu \cdot \frac{\partial^2 v_{\varphi n}}{\partial z^2} - 2 \cdot v_{rn} \cdot \omega - \frac{d\omega}{dt} \cdot r, \\ \frac{\partial h_n}{\partial t} + v_{rn} \cdot \frac{\partial h_n}{\partial r} = v_{zn}, \\ \frac{dm_n}{dt} = Q_n, \\ \frac{\partial v_{rv}}{\partial t} + v_{rv} \cdot \frac{\partial v_{rv}}{\partial r} - \frac{v_{\varphi v}^2}{r} + v_{zv} \cdot \frac{\partial v_{rv}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \cdot \frac{\partial^2 v_{rv}}{\partial z^2} + 2 \cdot v_{\varphi v} \cdot \omega + r \cdot \omega^2, \\ \frac{\partial v_{\varphi v}}{\partial t} + v_{rv} \cdot \frac{\partial v_{\varphi v}}{\partial r} + \frac{v_{rv} \cdot v_{\varphi v}}{r} + v_{zv} \cdot \frac{\partial v_{\varphi v}}{\partial z} = \nu \cdot \frac{\partial^2 v_{\varphi v}}{\partial z^2} - 2 \cdot v_{rv} \cdot \omega - \frac{d\omega}{dt} \cdot r, \\ \frac{\partial h_v}{\partial t} + v_{rv} \cdot \frac{\partial h_v}{\partial r} = v_{zv}, \\ \frac{dm_v}{dt} = Q_v, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $v_{rn}, v_{\varphi n}, v_{zn}, v_{rv}, v_{\varphi v}, v_{zv}$  — соответственно, радиальная, тангенциальная и нормальная компоненты относительной скорости для нижнего и верхнего слоя, м/с;  $p$  — давление, Па;  $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с;  $\rho$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega$  — угловая скорость вращения пластины, рад/с;  $m_n, m_v$  — масса дозы нижнего и верхнего слоев, кг;  $Q_n, Q_v$  — массовый расход жидкости, кг/с,  $h_v, h_n$  — высота верхнего и нижнего слоя, м.

Начальные значения компонент скорости для первого слоя обусловлены истечением жидкости из дозатора. Граничные условия для первого слоя: условие прилипания и не протекания на поверхности диска; кинематическое условие на свободной поверхности, где касательные напряжения равны нулю, коэффициент поверхностного натяжения постоянный.

Начальные условия:

$$t = 0 : \quad v_{rn} = v_{r0}, v_{\varphi n} = v_{\varphi 0}, v_{zn} = v_{z0}, m_n = m_0, \quad (2)$$

где  $t$  — время протекания процесса, с;  $v_{r0}, v_{\varphi 0}, v_{z0}$  — начальные значения компонент относительных скоростей (по координатам  $r, \varphi, z$ ), м/с;  $m_0$  — начальная масса дозы, находящаяся на пластине, кг.

Граничные условия:

$$\left\{ \begin{array}{l} z = 0 : v_{rn} = v_{\varphi n} = v_{zn} = 0; \\ z = h_v : \tau_r = \tau_\varphi = 0, v_{zv} = \frac{dh_v}{dt}; \\ r = 0 : v_{rn} = v_{\varphi n} = 0. \end{array} \right. \quad (3)$$

Примем:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_r = \sum_{i=1}^N \omega \cdot r \cdot f r_i \cdot \frac{(z-h_n)^i}{(h_v-h_n)^i}, \\ v_\varphi = \sum_{i=1}^N \omega \cdot r \cdot f f_i \cdot \frac{(z-h_n)^i}{(h_v-h_n)^i}, \end{array} \right. \quad (4)$$

где  $f r_i, f f_i$  — безразмерные функции времени,  $h_n, h_v$  — высота нижнего и верхнего слоя соответственно, м.

Для последующих слоев в качестве начальных значений параметров, описывающих течение, принимаются значения, полученные на предыдущем этапе.

После подстановки (2), (3), (4) в (1) и ряда преобразований итоговая система будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} h_n(t) = -\frac{1120}{3} f r_n(t) h_n(t) \\ \frac{d}{dt} R n_k(t) = -\frac{1}{2} \frac{R n_k(t) \frac{d}{dt} h_n(t)}{h_n(t)} \\ \frac{d}{dt} f r_n(t) = -\frac{1}{h_n(t)^2} F_1(f r_n(t), f f_n(t), h_n(t)) \\ \frac{d}{dt} f f_n(t) = -\frac{1}{h_n(t)^2} F_2(f r_n(t), f f_n(t), h_n(t)) \\ \frac{d}{dt} f r_v(t) = F_3(f r_n(t), f f_n(t), h_n(t), f r_v(t), h_v(t), f f_v(t)) \\ \frac{d}{dt} f f_v(t) = F_4(f r_n(t), f f_n(t), h_n(t), f r_v(t), h_v(t), f f_v(t)) \\ \frac{d}{dt} h_v(t) = -\frac{560}{3(h_v(t)-h_n(t))^2} F_5(f r_n(t), h_v(t), h_n(t), f r_v(t), h_v(t)) \\ \frac{d}{dt} R v_k(t) = -\frac{1}{2000\pi R v_k(t)(h_v(t)-h_n(t))} F_6(h_n(t), h_v(t), R v_k(t)) \end{array} \right. \quad (5)$$

где  $F_1(t), F_2(t), F_3(t), F_4(t), F_5(t), F_6(t)$  — известные функции времени, введенные с целью уменьшения размера уравнений.

Решение проводилось численно при следующих начальных условиях:  $t = 0$ :  $fr_v(t) = fr_{v0}(t)$ ,  $ff_v(t) = ff_{v0}(t)$ ,  $h_v(t) = h_0$ ,  $Rv_k(t) = R_0$ ,  $fr_n(t) = fr_{n0}(t)$ ,  $ff_n(t) = ff_{n0}(t)$ ,  $h_n(t) = h_n$ ,  $Rn_k(t) = Rn$ , где  $fr_{v0}(t)$ ,  $ff_{v0}(t)$  — начальные значения безразмерных функций времени для верхнего слоя;  $h_0$  — высота расположения дозатора над пластиной, м;  $R_0$  — радиус дозатора, м,  $fr_{n0}(t)$ ,  $ff_{n0}(t)$  — начальные значения безразмерных функций времени для нижнего слоя;  $h_n$  — высота слоя, полученная при расчете предыдущего слоя, м;  $R_n$  — радиус слоя, полученный при расчете предыдущего слоя, м.

Функции  $fr_{v0}(t)$ ,  $ff_{v0}(t)$  определены из условия баланса расходов и равенства нулю абсолютной тангенциальной скорости на верхней границе слоя.

Последующее решение проводилось для каждого слоя жидкости.

При объединении слоев (в момент времени, при котором радиус верхнего слоя равен радиусу нижнего слоя) проверяется условие возможности отрыва капель жидкости. Считалось, что если кинетическая энергия капли ( $Ek$ ), радиус которой равен половине высоты верхнего слоя, превышает поверхностную ( $Ep$ ), то отрыв возможен.

Экспериментальные исследования проводились с целью проверки полученных результатов моделирования процесса формирования тонкого слоя жидкости на поверхности пластины и выявления условий нарушения неразрывности пленочного течения. Для исследования динамики течения жидкости по поверхности вращающейся полупроводниковой пластины и определения условий разрыва проводились эксперименты с использованием видеосъемки. На предварительно подготовленную рабочую поверхность подложки, которая вращалась с заданной скоростью, наносилась доза жидкости необходимого объема. Течение снималось видеокамерой. Затем проводилась оцифровка видеоматериала и анализ по полученным кадрам различных этапов формирования пленки.

Изменялись следующие параметры:

- коэффициент кинематической вязкости жидкости;
- расход наносимой жидкости путем изменения скорости ее циркуляции в дозирующей системе;
- скорость вращения пластины за счет изменения величины напряжения, подаваемого на электродвигатель центрифуги;
- радиус дозатора и высота его расположения над поверхностью полупроводниковой пластины.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В итоге была решена задача, состоящая в определении зон возможного отрыва капель при разных режимах вращения.

Результаты численного решения математической модели представлены следующими графическими зависимостями: на рисунке 2 представлены графики зависимости радиуса отрывающейся капли от времени при различных угловых скоростях и расходе  $Q = 0,0301$  кг/с, на рисунке 3 представлены графики зависимости радиуса отрывающейся капли от текущего радиуса растекающегося по пластине слоя жидкости при различных угловых скоростях и расходе  $Q = 0,0301$  кг/с.

Из сравнительного анализа результатов, представленных на рисунках, можно сделать вывод о том, что зона преимущественного отрыва капель находится в интервале от  $0,1 R_{п}$  до  $0,5 R_{п}$  ( $R_{п}$  — радиус подложки) как при постоянной, так и при переменной угловой скорости. При рассмотрении жидкостей с разной вязкостью, было установлено, что чем меньше вязкость и чем больше скорость вращения подложки, тем больше максимальный радиус отрывающихся капель. Результаты, полученные при решении модели хорошо согласуются с наблюдаемыми

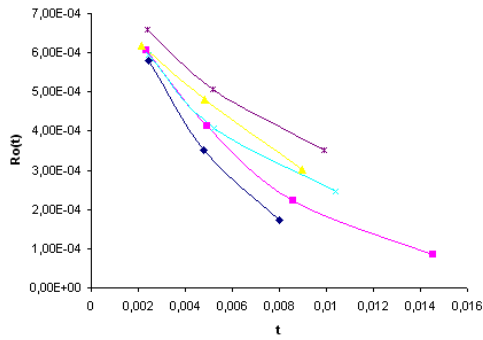


Рис. 2. Зависимость радиуса отрывающейся капли от времени при различных угловых скоростях и расходе  $Q = 0,0301$  кг/с. 1 –  $\omega = 500$  рад/с, 2 –  $\omega = 400$  рад/с, 3 –  $\omega = 300$  рад/с, 4 –  $\omega = 400 \cdot e^{-150t} + 100$  рад/с, 5 –  $\omega = 300 \cdot e^{-150t} + 100$  рад/с.

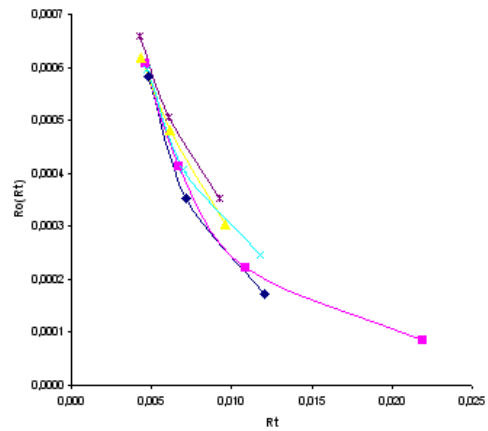


Рис. 3. Зависимость радиуса отрывающейся капли от текущего радиуса растекающегося по пластине слоя жидкости при различных угловых скоростях и расходе  $Q = 0,0301$  кг/с. 1 –  $\omega = 500$  рад/с, 2 –  $\omega = 400$  рад/с, 3 –  $\omega = 300$  рад/с, 4 –  $\omega = 400 \cdot e^{-150t} + 100$  рад/с, 5 –  $\omega = 300 \cdot e^{-150t} + 100$  рад/с.

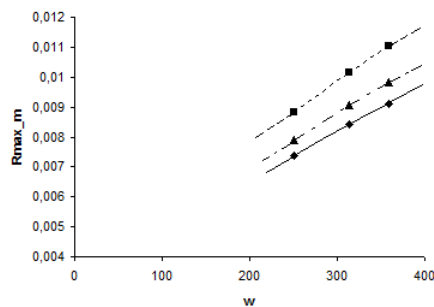


Рис. 4. Зависимость максимального радиуса отрывающейся капли от угловой скорости при различной вязкости жидкости.

в эксперименте.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет рассчитывать условия образования капель над получаемым покрытием. По результатам моделирования возможно провести оценку влияния технологических параметров: вязкости жидкости, объема дозы, скорости дозирования и вращения подложки на нарушение неразрывности пленочного течения и обоснование выбора конструкции оборудования для процессов формирования тонких полимерных покрытий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов, Г. В. Математическое моделирование процесса формирования тонких покрытий центрифугированием с целью определения рационального режима / Г. В. Абрамов, В. К. Битюков, Г. В. Попов // Инженерно-физический журнал. — 1994. — № 5 (66). — С. 561–567.
2. Мью Хейн Зо. Исследование параметров валика, образующегося на краях подложек при нанесении фоторезиста на центрифуге / Мью Хейн Зо, В. В. Ануфриенко // Естественные и технические науки. — 2006. — № 6 (26). — С. 278–282.
3. Зайцев, А. И. Ударные процессы в дисперсно-пленочных системах / А. И. Зайцев, Д. О. Бытев. — М. : Химия, 1994. — 214 с.
4. Абрамов, Г. В. Управление микромеханическими процессами в гидродинамических слоях при производстве полупроводниковых приборов / Г. В. Абрамов, В. К. Битюков, Г. В. Попов. — Воронеж : Воронежская государственная технологическая академия, 2001. — 213 с.

## REFERENCES

1. Abramov G.V., Bityukov V.K., Popov G.V. Mathematical modeling of the process of formation of thin coatings by centrifugation in order to determine the rational regime. [Abramov G.V., Bityukov V.K., Popov G.V. Matematicheskoe modelirovaniye processa formirovaniya tonkix pokrytij centrifugirovaniem s cel'yu opredeleniya racional'nogo rezhima]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1994, no. 5 (66), pp. 561–567.
2. Myo Hein Zaw, Anufrienko V.V. Study of parameters of the roller formed at the edges of the substrates when applying photoresist to the centrifuge. [M'о Хеjн Зо, Anufrienko V.V. Issledovanie parametrov valika, obrazuyushhegosya na krayax podlozhek pri nanesenii fotorezista na centrifuge]. *Estestvennye i texnicheskie nauki — Natural and technical Sciences*, 2006. no. 6 (26), pp. 278–282.
3. Zaitsev A.I., Bytev D.O. Shock processes in dispersed-film systems. [Zajcev A.I., Bytev D.O. Udarnye processy v dispersno-plenochnyx sistemax]. Moscow: Chemistry, 1994, 214 p.
4. Abramov G.V., Bityukov V.K., Popov G.V. Control of micromechanical processes in hydrodynamic layers in the production of semiconductor devices. [Abramov G.V., Bityukov V.K., Popov G.V. Upravlenie mikromexanicheskimi processami v gidrodinamicheskix sloyax pri proizvodstve poluprovodnikovyx priborov]. Voronezh: Voronezh state technological Academy, 2001, 213 p.

*Абрамов Г. В., д. т. н., профессор кафедры математики и прикладного анализа, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия*

*E-mail: abramov\_g@amm.vsu.ru*

*Tel.: +7(473)278-97-63*

*Abramov G. V., Dr. sci., Professor, department of mathematical and applied analysis, Voronezh state University, Voronezh, Russia*

*E-mail: abramov\_g@amm.vsu.ru*

*Tel.: +7(473)278-97-63*

*Бородина Е. А., ассистент кафедры высшей математики и информационных технологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия  
E-mail: eaborodina@inbox.ru*

*Borodina E. A., assistant of the department of higher mathematics and information technologies, Voronezh state University of engineering technologies, Voronezh, Russia  
E-mail: eaborodina@inbox.ru*