

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

УДК 621.723.162: [621.793.06:004.94]

DOI: 10.24151/1561-5405-2017-22-3-211-219

## Исследование и разработка реактора эпитаксиального наращивания для индивидуальной обработки подложек

*А.А. Кравченко, А.И. Погалов*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
г. Москва, Россия*

*t.t.kravchenko@gmail.com*

Эпитаксиальные процессы на подложках большого диаметра характеризуются формированием дефектных периферийных зон вследствие пластической деформации. Формирование зон с пластическими деформациями зависит от распределения температурных напряжений и способа нагрева и укладки подложки в реакторе.

Представлены математические модели расчета термомеханических напряжений подложки по ее радиусу и толщине. Исследовано влияние конструкции гнезда подложкодержателя и способа укладки подложки на ее устойчивость и жесткость. Рассмотрено влияние газодинамических характеристик технологического процесса на качество получаемых эпитаксиальных структур. Выполнено компьютерное моделирование газодинамических характеристик потока в эпитаксиальном реакторе. Исследованы три типа щелевого реактора: призматический, диффузорный, с удлиненным подложкодержателем. Разработаны научно-технические рекомендации проектирования реактора, а также эпитаксиальная установка ЕТМ 150 с использованием результатов исследований. Представлены результаты исследования эпитаксиальных структур.

Определяющим фактором в формировании пластических деформаций являются тангенциальные напряжения от поля температур по радиусу подложки. Для подложек большого диаметра целесообразно использование подложкодержателя с плоским гнездом.

*Ключевые слова:* эпитаксия; подложка; компьютерное моделирование; эпитаксиальный реактор; газодинамические характеристики; термомеханическое напряжение; пластическая деформация; подложкодержатель.

*Для цитирования:* Кравченко А.А., Погалов А.И. Исследование и разработка реактора эпитаксиального наращивания для индивидуальной обработки подложек // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т.22. – №3. – С. 211–219.

## **Research and Development of Single-Wafer Epitaxial Reactor**

*A.A. Kravchenko, A.I. Pogalov*

*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

*t.t.kravchenko@gmail.com*

Epitaxial processes on large diameter substrates are characterized by defective formation of the peripheral areas due to plastic deformation. The formation of zones of plastic deformation depends on the distribution of temperature stress and method of heating and laying the substrate in the reactor.

The mathematical models for calculating the thermomechanical tension on the substrate by its radius and thickness have been presented. The research of the influence the substrate holder socket design and method of supporting the substrate on its resistance and stiffness has been executed. The influence of gas dynamic characteristics of the technological process on the quality of epitaxial structures has been considered. Presented results the computer modeling gas-dynamic characteristics of the flow in the epitaxial reactor has been executed. Three types of slotted reactor: prismatic, diffuser and with a elongated substrate holder have been researched. Developed the scientific-technical recommendations by design reactor have been. Using the results of the research were developed epitaxial equipment ETM 150. The results of research of epitaxial structures have been presented.

The determining factor in the formation of the plastic deformations are tangential tension from the temperature field along the radius of the substrate. For large-diameter substrates it is advantageous to use the substrate holder with flat socket.

*Keywords:* epitaxy; substrate; computer modeling; epitaxial reactor; gas-dynamic characteristics; thermo-mechanical tension; plastic deformation; substrate holder.

*For citation:* Kravchenko A.A., Pogalov A.I. Research and Development of Single-Wafer Epitaxial Reactor // Proc. of universities. Electronics. – 2017. – Vol.22. – №3. – P. 211–219.

**Введение.** Эпитаксиальное наращивание полупроводниковых структур является одной из основных технологий микроэлектроники. С развитием этой технологии происходит увеличение диаметра обрабатываемых подложек с тенденцией уменьшения минимальной толщины эпитаксиальных пленок, повышаются требования к однородности и воспроизводимости толщины и удельного сопротивления эпитаксиального слоя, минимизации искажения топологического рисунка, кристаллографическому совершенству полученных слоев [1].

При разработке технологии эпитаксиального наращивания и конструкции реактора необходимо соблюдать следующие основные требования [2, 3]:

- высокая однородность и воспроизводимость толщины и удельного сопротивления получаемого эпитаксиального слоя;
- минимизация автолегирования из сильнолегированных скрытых слоев подложки и минимизация ширины переходной области между подложкой и эпитаксиальным слоем;
- однородность профиля легирующей примеси по толщине;

- минимизация искажения (смещения и размытия) топологического рисунка;
- низкая привносимая дефектность;
- высокое кристаллографическое совершенство получаемых слоев;
- высокая производительность, экономичность, безопасность.

Компьютерное моделирование технологического процесса химического осаждения тонких пленок из газовой фазы позволяет получить целостное представление о закономерностях влияния параметров технологии и конструкции на качество эпитаксиального слоя, а также значительно уменьшить временные и финансовые затраты в процессе разработки современного эпитаксиального реактора индивидуальной обработки подложек большого диаметра.

В настоящей работе исследуется влияние неравномерности температурного поля на напряженное состояние и механизмы пластической деформации на подложках большого диаметра, анализируются газодинамические характеристики потока в щелевом кварцевом реакторе. Также описывается разработанная модель влияния неравномерности температурного поля на напряженно-деформированное состояние и механизмы пластической деформации в подложке, методика расчета напряженно-деформированного состояния подложки в подложкодержателе и методика исследования газодинамических характеристик реактора с использованием программного комплекса для инженерных расчетов методом конечного элемента.

**Исследование напряженно-деформированного состояния подложки.** Эпитаксиальные процессы на одиночных подложках большого диаметра характеризуются формированием дефектных периферийных зон вследствие пластической деформации [4]. Появление пластических деформаций и напряжений обусловлено неравномерностью распределения температуры по подложке в условиях высокотемпературного нагружения. Формирование зон с пластическими деформациями зависит от распределения температурных напряжений и способа нагрева и укладки подложки в реакторе. Распределение радиальных и тангенциальных напряжений в подложке определяется полем температур, изменяющимся как по радиусу, так и по толщине подложки. При конструировании подложкодержателя важно установить определяющий вид температурного нагружения. С этой целью проведены исследования напряженно-деформированного состояния подложки при осесимметричном изменении температуры по ее диаметру и толщине [5].

Осесимметричное тепловое нагружение подложки возникает при свободной ее укладке на подложкодержатель и при осесимметричной неравномерности теплового потока от внешних источников нагрева. В этом случае температура на нижней и верхней поверхностях является функцией радиуса и не зависит от полярного угла.

Для расчета нормальных напряжений в локальном объеме подложки в радиальном  $\sigma_r$  и тангенциальном  $\sigma_\theta$  направлениях при осесимметричном изменении температуры по диаметру подложки получены следующие математические зависимости:

$$\sigma_r = \frac{1}{6} \alpha E \Delta T_{0R} (1 - t^4), \quad \sigma_\theta = \frac{1}{6} \alpha E \Delta T_{0R} (1 - 5t^4),$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения;  $E$  – модуль упругости кремниевой подложки с плоскостью (111), равный  $1,5 \cdot 10^5$  МПа при температуре 1200 °С;  $\Delta T_{0R}$  – перепад температуры по радиусу;  $t = \frac{r}{R}$  – относительный радиус подложки.

Анализ полученных уравнений показал, что напряжения в круглой тонкой подложке зависят от относительного радиуса подложки и определяются перепадом температур и модулем упругости. При осесимметричном изменении температуры по диаметру кремниевой подложки тангенциальное растягивающее напряжение  $\sigma_\theta$  максимально на периферии. При перепаде температуры 20 °С по радиусу пластины имеем  $\sigma_\theta \sim 11$  МПа. Для кремния предел текучести при 1200 °С составляет  $\sim 10$  МПа. Это значит, что на периферии подложки формируется пластическая деформация.

Математические модели для расчета напряжений при перепаде температуры по толщине подложки имеют вид

$$\sigma_r = \frac{Ez}{1-\mu^2} \frac{\alpha \Delta T_0}{h} (1-\mu)(1+\mu) \frac{1}{4} \left( \frac{r^2}{R^2} - 1 \right),$$

$$\sigma_\theta = \frac{Ez}{1-\mu^2} \frac{\alpha \Delta T_0}{h} (1-\mu)(1+\mu) \frac{1}{4} \left( 3 \frac{r^2}{R^2} - 1 \right),$$

где  $z$  – расстояние от срединной поверхности;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\Delta T_0$  – перепад температуры по толщине;  $h$  – толщина подложки.

При осесимметричном перепаде температуры 10 °С по толщине подложки максимальное  $\sigma_\theta \sim 1,2$  МПа, что на порядок меньше предела текучести кремния при температуре 1200 °С, соответствующего процессу эпитаксии. Поэтому определяющим фактором при формировании линий скольжения являются тангенциальные напряжения от поля температур по радиусу.

Качество эпитаксиального процесса зависит от конструкции гнезда подложкодержателя [6]. Деформация подложки при заданном поле температур зависит от гравитационных сил и конфигурации гнезда подложкодержателя. Рассмотрим два основных способа укладки подложки в гнездо подложкодержателя: подложка свободно опирается на кольцевую опору; подложка свободно лежит в гнезде подложкодержателя. Схемы распределения нагрузки по подложке показаны на рис.1.

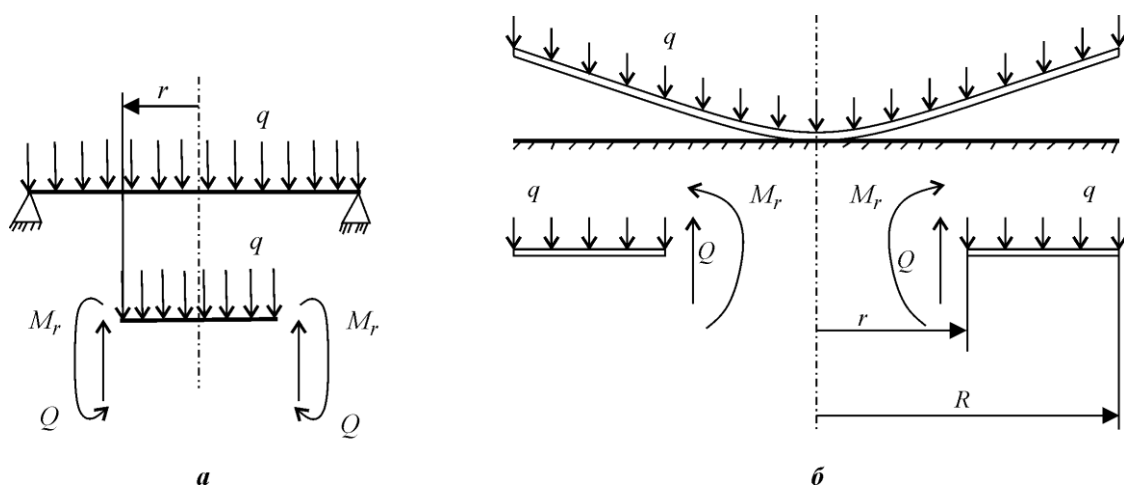


Рис.1. Схема распределения нагрузки по подложке: а – подложка свободно опирается на кольцевую опору; б – подложка свободно лежит в гнезде подложкодержателя с центральной опорой ( $q$ ,  $Q$  – распределенная и поперечная нагрузки соответственно;  $M_r$  – момент сил)

Осесимметричный прогиб подложки, свободно опертой по внешнему периметру на кольцевой опоре, с учетом действия гравитационных сил оценивается по следующей формуле:

$$Z = \frac{1}{k\alpha} \left( 1 - \sqrt{1 - R^2 \alpha^2 k^2} \right) + \frac{qR^4 (5 + \mu) \cdot 12(1 - \mu^2)}{64Eh^3 (1 + \mu)},$$

где  $k$  – градиент температуры по толщине.

Задача относится к плоским, поскольку в осесимметричной задаче все характеристики являются функцией текущего радиуса. Для подложек диаметром более 200 мм при градиенте температур более 4 °С прогиб может превысить исходный зазор, составляющий 200 мкм. Прогиб при градиенте температур 8 °С/мм толщины составляет 236 мкм. Это может привести к потере устойчивости подложки, свободно опертой по внешнему периметру.

Суммарный осесимметричный прогиб для подложки с центральной опорой при действии гравитационных сил в условиях высокотемпературной обработки равен разности прогибов от градиента температуры и гравитационных сил. Расчетное уравнение максимального прогиба на периферии для подложки с центральной опорой имеет вид

$$Z = \frac{1}{k\alpha} \left( 1 - \sqrt{1 - R^2 \alpha^2 k^2} \right) - \frac{2,44qR^4 (1 - \mu^2)}{Eh^3}.$$

Гравитационные силы при центральной опоре для подложки значительно снижают зазор между подложкой и плоскостью подложкодержателя. Суммарный прогиб подложки, опертой по контуру, равен сумме прогибов от градиента температуры по толщине и от гравитационных сил. Так, для подложки толщиной 800 мкм и диаметром 200 мм суммарный прогиб при градиенте температуры 4 °С/мм равен 114 мкм. Суммарный прогиб для подложки, лежащей на плоскости, равен разности прогибов от градиента температуры и гравитационных сил. Для подложки диаметром 200 мм суммарный прогиб равен 39 мкм. Это приводит к тому, что перепад температуры по диаметру пластины уменьшается, а следовательно уменьшается и тангенциальное напряжение, ответственное за пластическую деформацию.

#### **Исследование газодинамических характеристик эпитаксиального реактора.**

Рассмотрено влияние газодинамических характеристик технологического процесса на качество получаемых эпитаксиальных слоев [7]. Неравномерность скорости газового потока оказывает существенное влияние на скорости роста эпитаксиального слоя по подложке. Для поиска путей выравнивания скорости потока по подложке необходимо проведение анализа газодинамических характеристик в реакторе [8]. Расчет газодинамических характеристик потока в кварцевом реакторе индивидуальной обработки подложек проводился с использованием комплекса инженерного программного обеспечения. Исследовались три типа щелевого реактора: призматический, диффузорный и с удлиненным подложкодержателем (рис.2).

В реакторе выделены зона прогрева газа длиной 110 мм, зона подложкодержателя с подложкой длиной 215 мм и зона охлаждения газа. Исходные параметры для расчета выбирались соответственно процессу эпитаксии кремниевых подложек в газовой среде  $H_2-SiH_4$ ,  $H_2-SiHCl_4$  и  $H_2-SiH_4Cl_2$  с концентрацией водорода 97 %. При проведении расчетов налагались следующие граничные условия: расход газа на входе в реактор 3000, 4000, 7000 л/ч; газовый поток на входе в реактор равномерный; температура газа на входе в реактор 25 °С; температура стенок реактора 600 °С; температура подложкодержателя 1000 °С; профиль скорости газового потока на входе в реактор равномерный.

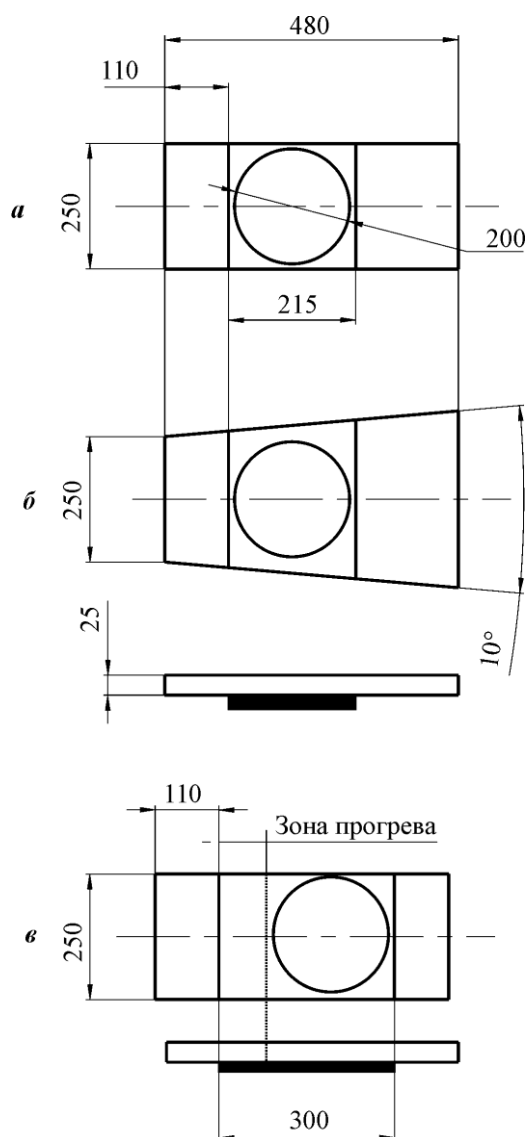


Рис.2. Схемы реакторов: а – щелевой; б – щелевой с диффузором; в – щелевой с удлиненным подложкодержателем

Модели распределения полей скоростей и температуры представлены на рис.3. Анализ газодинамических характеристик щелевого реактора позволяет сделать следующие выводы: газовый поток в щелевом реакторе ламинарный; влияние третьей зоны на характер газового потока на второй зоне практически отсутствует. Вертикальная скорость газового потока в канале невелика и достигает 0,04 м/с на границах участков. Сравнение результатов, полученных для призматического и диффузорного реакторов, показало, что введение диффузора неоправданно, поскольку градиент скорости сохраняется большим [9]. Например, перепад скорости по подложке при расходе газа 4000 л/ч при использовании призматического реактора достигает 24 %, а при применении диффузорного реактора – 14 %.

При анализе результатов моделирования установлено, что стабилизация скорости потока начинается в среднем через 150 мм от начала подложкодержателя. В реакторе щелевого типа с удлиненным подложкодержателем скорость газового потока в зоне подложки близка к равномерной. При расходах газа 3000–7000 л/ч в пределах подложки разброс скорости не превышает 10 %. Введение удлиненного подложкодержателя позволяет уменьшить разброс толщины эпитаксиального слоя и температуры по подложке.

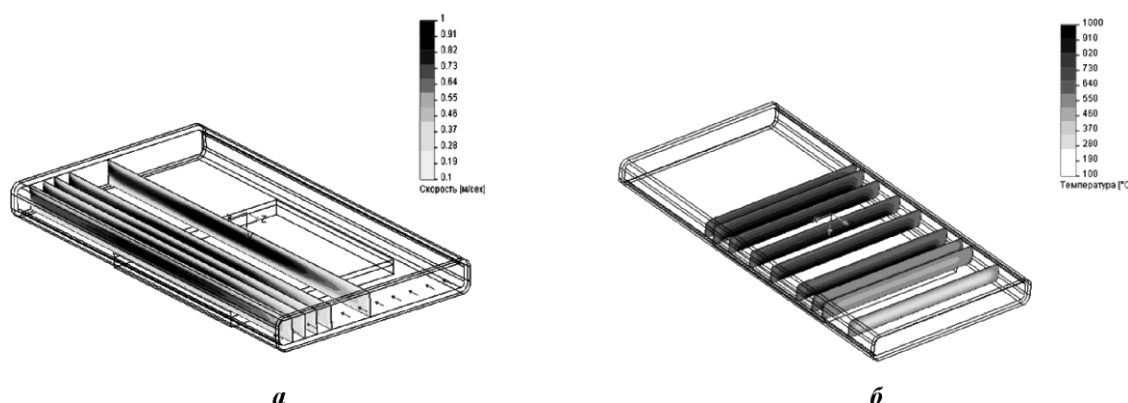


Рис.3. Модель распределения полей скоростей (а) и температур (б) в реакторе



**Результаты и их обсуждение.** С использованием полученных результатов исследования разработана высокотемпературная эпитаксиальная установка ЕТМ 150 для одиночных подложек диаметром 150–200 мм. Установка предназначена для наращивания эпитаксиальных слоев Si–Si, Si–сапфир (КНС).

Исследованы толщина и удельное сопротивление эпитаксиального слоя по подложке КДБ-10 диаметром 150 мм. Расход водорода в основной канал равен 4000 л/ч. Температура процесса составляла 1190 °С. Процесс эпитаксиального наращивания проходил без легирования. Результаты исследования толщины и удельного сопротивления эпитаксиального слоя приведены на рис.4.

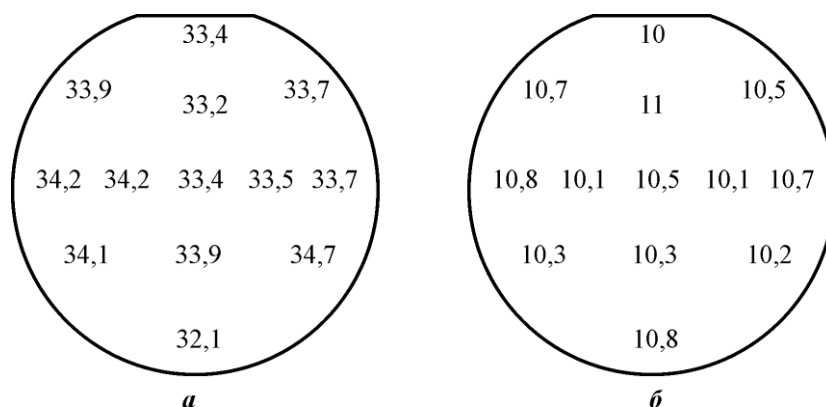


Рис.4. Результаты исследования разброса толщины (а) и удельного сопротивление (б) эпитаксиального слоя на кремниевой подложке КДБ-10 диаметром 150 мм

Также проведены испытания по получению КНС-структур на подложке диаметром 150 мм. Результаты исследования приведены в таблице.

**Результаты исследования эпитаксиальных КНС-структур, полученных на подложках диаметром 150 мм**

Параметр		Номер пластины			
		JMCN-811-869	JMCN-806-606	JMCN-811-826	SMCN-801-664
Температура роста, °С		1080	1030	1030	1030
Расход, л/ч		4000	4000	6000	6000
Скорость вращения, об./мин		15	15	0	0
Толщина, мкм	База	1,094	0,971	0,795	0,79
	Центр	1,11	1,072	0,88	0,86
	Низ	1,002	1,017	0,86	0,792
	Лево	1,011	0,976	0,843	0,788
	Право	1,086	0,984	0,8	0,793
Средний разброс толщины, %		5,1	5	5	4,6
Удельное сопротивление, Ом/кв	База	25,1	6,4	0,3	0,31
	Центр	23,5	7	0,281	0,285
	Низ	25,2	7,1	0,31	0,3
	Лево	22,9	6,5	0,29	0,29
	Право	26,2	6,8	0,29	0,3
Средний разброс удельного сопротивления, %		6	5	5	5

Испытания эпитаксиальной установки ЕТМ 150 выявили следующие недостатки: стабилизация температурного поля подложкодержателя затруднена, что связано с неоптимальной конструкцией и расположением датчиков контроля температуры; возникает биение привода вращения, которое до конца не устраняется с помощью юстированных узлов.

**Заключение.** Математические модели расчета напряженно-деформированного состояния подложки при осесимметричном изменении температуры по ее радиусу и толщине позволили установить, что определяющим фактором формирования пластической деформации и линий скольжения в подложке являются тангенциальные напряжения, возникающие от перепада температуры по радиусу.

Проведенные исследования влияния конструкции гнезда подложкодержателя и способа укладки подложки на ее устойчивость и прогиб показали, что для подложек диаметром 200 мм целесообразно использовать подложкодержатель с плоским гнездом.

Анализ газодинамических характеристик позволил разработать научно обоснованные рекомендации проектирования щелевого реактора. Дополнительная зона прогрева на подложкодержателе позволяет устранить неравномерность скоростного и температурного поля в зоне подложки.

Разработанные научно-технические рекомендации использованы при создании опытной установки ЕТМ 150.

### *Литература*

1. *Кравченко А.А., Погалов А.И., Тимофеев В.Н.* Исследование и моделирование газодинамических характеристик эпитаксиального реактора // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2013. – № 4. – С. 14–17.
2. *Емельянов В.А., Турцевич А.С., Наливайко О.Ю.* Оборудование для химического осаждения из газовой фазы функциональных слоев. – Минск: Наука, 2007. – 255 с.
3. *Seshan K.* Handbook of Thin Film Deposition 3rd Edition. – 2012. – 408 p.
4. *Sze S.M.* Semiconductor devices: physics and technology. – Wiley-India, 2008. – 384 p.
5. *Сажнев С.В., Тимофеев В.Н., Миркурбанов Х.А.* Механизм формирования линий скольжения в полупроводниковых пластинах при высокотемпературной обработке // Материаловедение. – 2004. – № 4. – С. 12–16.
6. *Sami Franssila.* Introduction to Microfabrication. – 2-nd ed. – Wiley, 2010. – 518 p.
7. *Cavallotti C., Masi M.* Kinetics of SiHCl<sub>3</sub> Chemical Vapor Deposition and Fluid Dynamic Simulations // J. Of Nanoscience and Nanotechnology. – 2011. – No. 11. P. 8054–8060.
8. *Newman A.J., Krishnaprasad P.S.* Modeling and Optimization for Epitaxial Growth: Transport and Growth Studies. – Technical Report CDCSS, 1999. – 41 p. – URL: <http://hdl.handle.net/1903/6114> (дата обращения 18.01.2017 г.).
9. *Тимофеев В.Н., Миркурбанов Х.А., Кравченко А.А., Вережкин Д.В.* Сравнительные характеристики газового потока в щелевых реакторах эпитаксиального наращивания призматического и диффузорного типов // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2009. – №1. – С. 34–39.

Поступила 24.01.2017 г.; принята к публикации 21.03.2017 г.

*Кравченко Анатолий Анатольевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики МИЭТ (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), [t.t.kravchenko@gmail.com](mailto:t.t.kravchenko@gmail.com)

*Поголов Анатолий Иванович* – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой технической механики МИЭТ (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), [dtm@miee.ru](mailto:dtm@miee.ru)



## References

1. Kravchenko A.A., Pogalov A.I., Timofeev V.N. Issledovanie i modelirovanie gazodinamicheskikh kharakteristik ehpitaksial'nogo reaktora [Research and simulation gas-dynamic characteristics of epitaxial reactor]. *Oboronnyj kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii – Defense Complex to Scientific- and Technological Advance of Russia*, 2013, no.4, pp. 14–17. (In Russian).
2. Emel'yanov V.A., Turtsevich A.S., Nalivajko O.YU. *Oborudovanie dlya khimicheskogo osazhdeniya iz gazovoj fazy funktsional'nykh sloev* [Equipment for chemical vapor deposition of functional layers]. Minsk, Nauka, 2007. 255 p. (In Russian).
3. Seshan K. *Handbook of Thin Film Deposition*. 3<sup>rd</sup> ed. 2012. 408 p.
4. Sze S.M. *Semiconductor devices: physics and technology*. New York, Wiley-India, 2008. 384. p.
5. Sazhnev S.V., Timofeev V.N., Mirkurbanov KH.A. Mekhanizm formirovaniya linij skol'zheniya v poluprovodnikovyx platinakh pri vysokotemperaturnoj obrabotke [The mechanism of formation of slip lines in semiconductor wafers in high-temperature processing]. *Materialovedenie – Materials Sciences Transactions*, 2004, no.4, pp. 12–16. (In Russian).
6. Sami Franssila. *Introduction to Microfabrication*. 2<sup>nd</sup> ed. New York, Wiley, 2010. 518 p.
7. Cavallotti C., Masi M. Kinetics of SiHCl<sub>3</sub> Chemical Vapor Deposition and Fluid Dynamic Simulations. *J. Of Nanoscience and Nanotechnology*, 2011, no. 11, pp. 8054–8060.
8. Newman A.J., Krishnaprasad P.S. *Modeling and Optimization for Epitaxial Growth: Transport and Growth Studies*, 1999. 41 p. Available at: <http://hdl.handle.net/1903/6114> (accessed: 18.01.2017).
9. Timofeev V.N., Mirkurbanov KH.A., Kravchenko A.A., Verevkin D.V. Sravnitel'nye kharakteristiki gazovogo potoka v shhelevykh reaktorakh ehpitaksial'nogo narashhivaniya prizmaticheskogo i diffuzornogo tipov [Comparative characteristics of the gas flow in the epitaxial slit reactors of prismatic and diffuser types]. *Oboronnyj kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii – Defense Complex to Scientific- and Technological Advance of Russia*. 2009, no.1, pp. 34–39. (In Russian).

Submitted 24.01.2017; accepted 21.03.2017.

## Информация для читателей журнала

### «Известия высших учебных заведений. Электроника»

Вы можете оформить подписку на 2017 г. в редакции с любого номера. Стоимость одного номера – 1000 руб. (с учетом всех налогов и почтовых расходов).

Адрес редакции: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, МИЭТ, комн. 7231.

Тел.: 8-499-734-62-05. E-mail: [magazine@miee.ru](mailto:magazine@miee.ru)

<http://www.miet.ru>