

УДК 004.657:004.43

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННОМУ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМУ АНАЛИЗУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ



В.С. Дроздов

Ассистент кафедры инженерной психологии и эргономики БГУИР, магистр технических наук



К.Д. Яшин

Заведующий кафедрой инженерной психологии и эргономики БГУИР, кандидат технических наук, доцент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

E-mail: kafipie@bsuir.by

В.С. Дроздов

Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники в 2014 году по специальности Проектирование и производство радиоэлектронных средств. В 2015 году окончил магистратуру по специальности Психология труда, инженерная психология, эргономика. Читаемые курсы: Микросистемные технологии, Специальные языки программирования. Направление научных исследований: разработка информационной системы повышения эффективности визуальной рекламы.

К.Д. Яшин

После окончания Белорусского государственного университета работал в научно-производственном объединении «Интеграл» в специальном конструкторско-технологическом подразделении. Защитил кандидатскую диссертацию «Формирование субмикронных кремнийсодержащих пленок в технологии сверхбольших интегральных схем». В Минском научно-исследовательском институте радиоматериалов освоил АзБ₅ и А₂Б₆-технологии. Имеет звание «Изобретатель СССР». Информационные технологии изучил, работая в главном информационно-аналитическом управлении концерна «Белресурсы», а также на факультете компьютерного проектирования БГУИР. Один из организаторов конференции «Big Data and Advanced Analytics».

Аннотация. Представлены результаты практико-ориентированного и образовательного анализа технологических процессов изготовления изделий микросистемной техники. Практические работы содержат индивидуальные задания по разработке компьютерных программ для расчетов параметров технологических процессов, а также по проведению анализа полученных результатов с целью определения взаимного влияния параметров процессов.

Ключевые слова: анализ, обучение, микросистемные технологии, корреляция, компьютерная программа.

Введение

Научно-техническая конференция «BIG DATA and Advanced Analytics», впервые проведенная в 2015 году в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники, дала мощный импульс развитию образовательного процесса на кафедре инженерной психологии и эргономики. В учебный процесс подготовки специалистов с выс-

шим образованием и квалификацией инженер-системотехник впервые введены специальные дисциплины: Основы BIG DATA; Основы технологии R; Алгоритмы машинного обучения; Визуализация больших данных и др. [1-4]. Цель настоящей работы – сформировать практические задачи для студентов и магистрантов, изучающим технологии программирования и технологии обработки больших массивов информации. Представлены две технические дисциплины, изложен системный подход к проведению практико-ориентированного и образовательного анализа технологических процессов изготовления изделий микросистемной техники. Изделия микросистемной техники (рисунок 1) имеют широкое применение в разработках новейших космических систем и систем вооружения во многих индустриально развитых странах [5-9]. Медицинские приборы и устройства с использованием изделий микросистемной техники также широко применяются в современной хирургической и диагностической практике [10-13].

Представление двух специальных дисциплин «Микросистемные технологии» и «Специальные технологические процессы и обработка больших данных» построено, как уже отмечалось выше, на основе исследований и анализа опыта научно-технической конференции «BIG DATA and Advanced Analytics», а также на основе анализа классического зарубежного опыта в области технологий сверхбольших интегральных схем и микросистемных технологий [14-17].

Результаты разработки

Выполнение практических работ проводится по алгоритму, представленному на схеме (рисунок 3). Обучающимся предложены формулы, которые, в первом приближении, описывают математические модели исследуемых технологических процессов [14-17].

Практическая работа «Исследование процессов получения кристаллов». Цель: разработать компьютерную программу для анализа распределения концентрации примеси в слитке полупроводникового кремния. Построить график зависимости концентрации примеси железа и объема расплава. Рассчитать концентрацию железа в затравочной и хвостовой частях слитка, зная, что в начальный момент времени в Y г расплава кремния растворилось X см³ материала кварцевого тигля, имевшего концентрацию железа Z см⁻³. Доля закристаллизовавшегося расплава в затравочной и хвостовой частях составляет P и R %, соответственно. Исходные данные для 30 вариантов представлены в таблице 1. Определена математическая модель технологического процесса. Используются расчетные формулы [14] для нахождения концентрации примеси в затравочной (C_{sz}) и хвостовых (C_{sx}) частях слитка:

$$\begin{array}{l} C_{sz} = K_0 C_0 (1 - P)^{(K_0 - 1)}, \\ C_{sx} = K_0 C_0 (1 - R)^{(K_0 - 1)}, \end{array}$$

где K_0 – равновесный коэффициент сегрегации, C_0 – первоначальная концентрация примеси в расплаве, P, R – доля закристаллизовавшегося расплава в затравочной и хвостовой частях слитка.

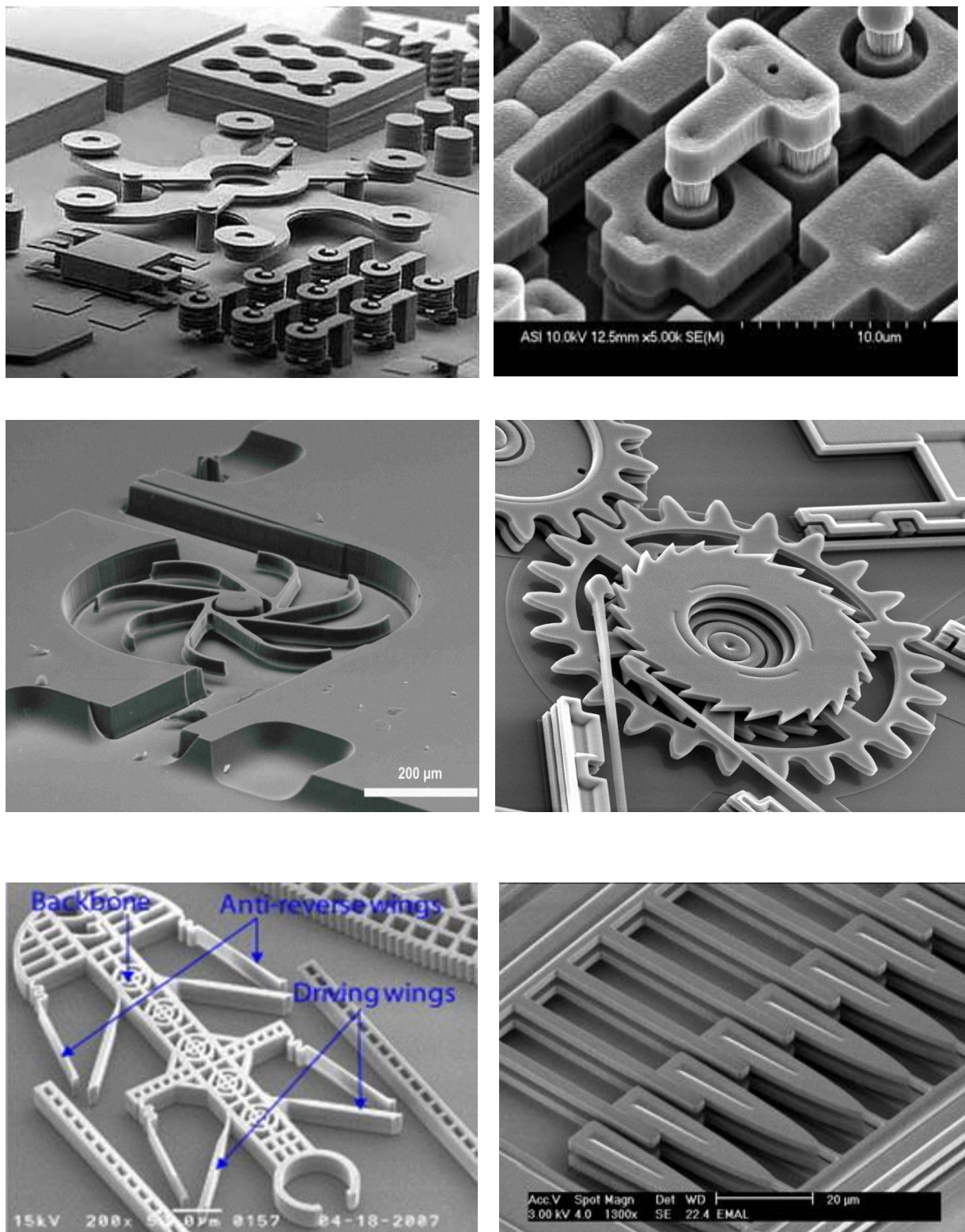


Рисунок.1. Микрофотографии изделий микросистемной техники (интернет-ресурсы)

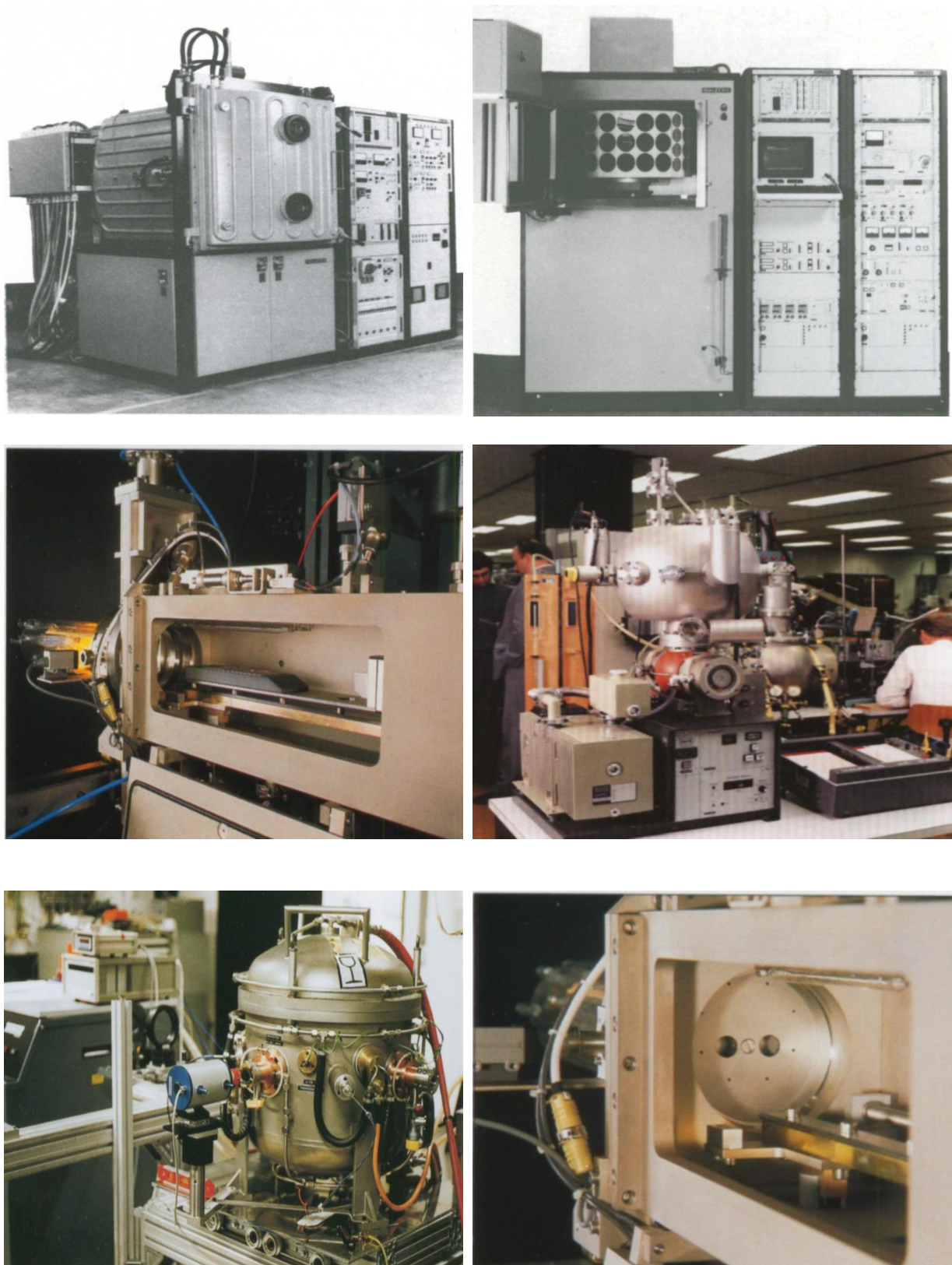


Рисунок 2. Технологическое оборудование производств изделий микросистемной техники (интернет-ресурсы)



Рисунок 3. Схема алгоритма выполнения практической работы

Разработан интерфейс (рисунок 4) и программное обеспечение для автоматизации процесса вычислений. Результаты вычислений представлены в таблице 2. Определена корреляция объема расплава и концентрации примеси (рисунок 5).

Таблица 1.

Исходные данные для выполнения практической работы

Вариант	X, см ³	Y, г	Z×10 ¹⁸ , см ⁻³	P, %	R, %	Вариант	X, см ³	Y, г	Z×10 ¹⁸ , см ⁻³	P, %	R, %
1	300	16500	2,0	0	90	16	450	16650	3,5	7,5	75
2	310	16510	2,1	0,5	89	17	460	16660	3,6	8	74
3	320	16520	2,2	1	88	18	470	16670	3,7	8,5	73
4	330	16530	2,3	1,5	87	19	480	16680	3,8	9	72
5	340	16540	2,4	2	86	20	490	16690	3,9	9,5	71
6	350	16550	2,5	2,5	85	21	500	16700	4,0	10	70
7	360	16560	2,6	3	84	22	510	16710	4,1	10,5	69
8	370	16570	2,7	3,5	83	23	520	16720	4,2	11	68
9	380	16580	2,8	4	82	24	530	16730	4,3	11,5	67
10	390	16590	2,9	4,5	81	25	540	16740	4,4	12	66
11	400	16600	3,0	5	80	26	550	16750	4,5	12,5	65
12	410	16610	3,1	5,5	79	27	560	16760	4,6	13	64
13	420	16620	3,2	6	78	28	570	16770	4,7	13,5	63
14	430	16630	3,3	6,5	77	29	580	16780	4,8	14	62
15	440	16640	3,4	7	76	30	590	16790	4,9	14,5	61

Таблица 2

Результаты вычислений

Вариант	C, см ⁻³	V, см ³	Вариант	C, см ⁻³	V, см ³
1	1,6×10 ¹³	6226,415	16	3,027×10 ¹³	6283,019
2	1,688×10 ¹³	6230,183	17	3,217×10 ¹³	6286,792
3	1,778×10 ¹³	6233,962	18	3,322×10 ¹³	6290,566
4	1,868×10 ¹³	6237,736	19	3,429×10 ¹³	6294,34
5	1,959×10 ¹³	6241,509	20	3,536×10 ¹³	6298,113
6	2,051×10 ¹³	6245,283	21	3,644×10 ¹³	6301,887
7	2,474×10 ¹³	6249,057	22	3,754×10 ¹³	6305,66
8	2,9×10 ¹³	6252,83	23	3,865×10 ¹³	6309,434
9	2,333×10 ¹³	6256,604	24	3,977×10 ¹³	6313,208
10	2,429×10 ¹³	6260,377	25	4×10 ¹³	6316,981
11	2,526×10 ¹³	6264,151	26	4,23×10 ¹³	6320,755
12	2,624×10 ¹³	6267,925	27	4,347×10 ¹³	6324,528
13	2,809×10 ¹³	6271,698	28	4,465×10 ¹³	6328,302
14	2,824×10 ¹³	6275,472	29	4,585×10 ¹³	6332,075
15	2,925×10 ¹³	6279,245	30	4,706×10 ¹³	6339,623

Объем материала X, см³

Масса расплава Y, г

Концентрация железа в материале Z, *10¹⁸ см⁻³

Доля закристаллизовавшегося расплава в затравочной части P, %

Доля закристаллизовавшегося расплава в хвостовой части R, %

Промежуточные данные
 N0 = 2,279*10²¹
 Vr = 6313,208 см³
 C0 = 3,61*10¹⁴ см⁻³

Рассчитать

Концентрация примеси в затравочной части нач, см⁻³

Концентрация примеси в хвостовой части нач, см⁻³

Концентрация примеси в затравочной части, см⁻³

Концентрация примеси в хвостовой части, см⁻³

Рисунок 4. Интерфейс программного продукта

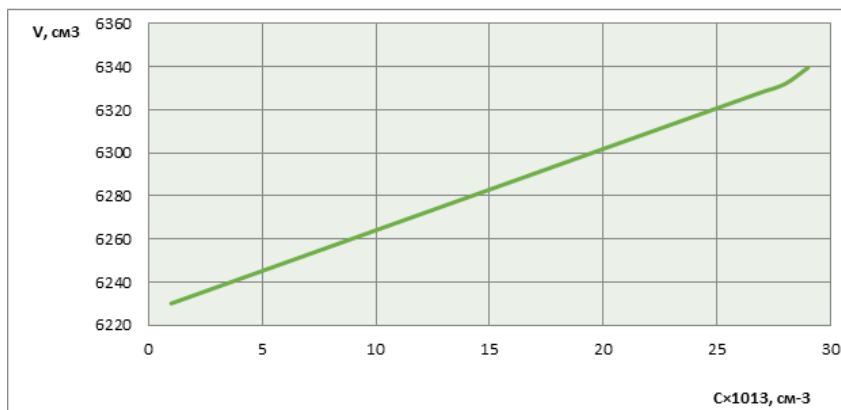


Рисунок 5. Корреляция между объемом расплава (V) и концентрацией примеси (C)

Практическая работа «Исследование процессов получения подложек». Цель: создать компьютерную программу для анализа процессов удаления с подложек приповерхностных дефектов, вызванных абразивной обработкой. Построить график зависимости объема необходимых для травления кислот HF и HNO₃ от диаметра подложек. Рассчитать объем кислот HF и HNO₃, который необходим для X подложек диаметром D мм. Исходные данные для 30 вариантов представлены в таблице 3. Определена математическая модель технологического процесса. Используются расчетные формулы для нахождения объема кислот HF и HNO₃:

$$V = \frac{\pi \times D^2}{4} \times N \times h,$$

где D – диаметр подложки, N – количество подложек, h – глубина травления ~20 мкм.

Разработан интерфейс (рисунок 6) и программное обеспечение для автоматизации процесса вычислений. Результаты вычислений представлены в таблице 4. Построен график зависимости объема необходимых для травления кислот от диаметра подложек (рисунок 7).

Таблица 3

Исходные данные для выполнения работы

Вариант	X, шт	D, мм	Вариант	X, шт	D, мм
1	100	40	16	75	150
2	100	40	17	70	175
3	100	40	18	70	175
4	95	60	19	70	200
5	95	60	20	70	200
6	95	60	21	65	225
7	90	75	22	65	225
8	90	75	23	65	250
9	90	75	24	65	250
10	85	100	25	50	300
11	85	100	26	50	300
12	85	100	27	50	350
13	80	125	28	50	350
14	80	125	29	50	400
15	75	150	30	50	400

Таблица 4

Результаты вычислений

Вариант	X, шт	D, мм	V, см ³	Вариант	X, шт	D, мм	V, см ³
1	100	40	2,513274	16	75	150	26,507188
2	100	40	2,513274	17	70	175	33,673947
3	100	40	2,513274	18	70	175	33,673947
4	95	60	5,372123	19	70	200	43,982298
5	95	60	5,372123	20	70	200	43,982298
6	95	60	5,372123	21	65	225	51,689017
7	90	75	7,952157	22	65	225	51,689017
8	90	75	7,952157	23	65	250	63,813600
9	90	75	7,952157	24	65	250	63,813600
10	85	100	13,351769	25	50	300	70,685835
11	85	100	13,351769	26	50	300	70,685835
12	85	100	13,351769	27	50	350	96,211275
13	80	125	19,634954	28	50	350	96,211275
14	80	125	19,634954	29	50	400	125,663706
15	75	150	26,507188	30	50	400	125,663706



Рисунок 6. Интерфейс программного продукта

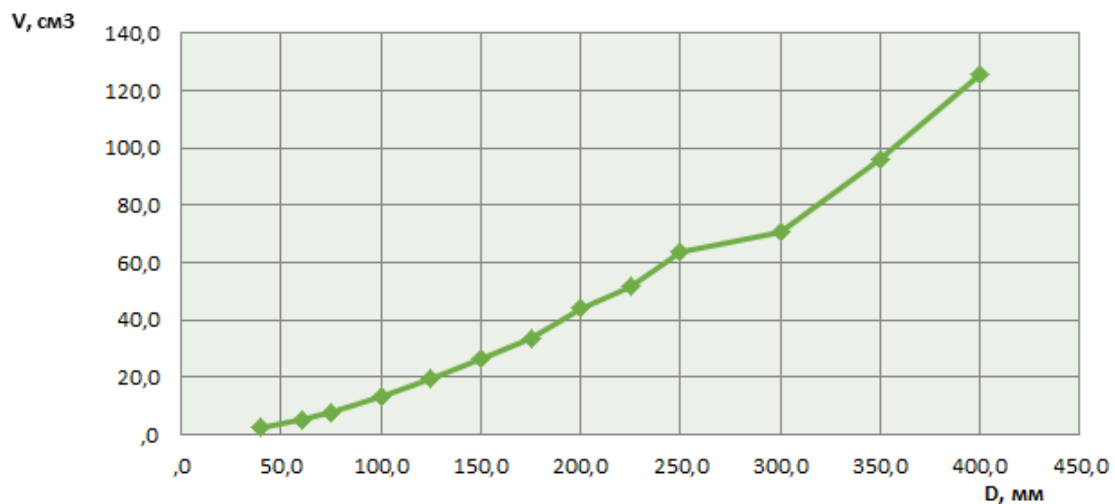


Рисунок 7. Зависимость объема (V) необходимых для травления кислот HF и HNO₃ от диаметра (D) подложек

Практическая работа «Исследование процессов осаждения диэлектрических плёнок». Цель: создать компьютерную программу для определения процентного содержания примеси хлора в пленке SiO₂. Построить график зависимости процентного содержания Cl от толщины плёнки. Определить содержание хлора в плёнке SiO₂, если средняя концентрация хлора в начальных слоях плёнки толщиной X нм составляет C см⁻³. Исходные данные для 30 вариантов представлены в таблице 5. Определена математическая модель технологического процесса. Используются расчетные формулы для нахождения процентного содержания хлора μ в плёнке SiO₂:

$$\mu = \frac{C(Cl) \times M_r(SiO_2) \times D}{3 \times \rho(SiO_2)},$$

где C(Cl) – средняя концентрация хлора в начальных слоях осаждённой плёнки, M_r(SiO₂) – относительная молекулярная масса SiO₂, D – атомная единица массы, ρ(SiO₂) – плотность оксида кремния.

Разработан интерфейс (рисунок 8) и программное обеспечение для автоматизации процесса вычислений. Результаты вычислений представлены в таблице 6. Построен график зависимости процентного содержания хлора от толщины осажденной пленки (рисунок 9).

Таблица 5

Исходные данные для выполнения работы

Вариант	X, мкм	C, см ⁻³	Вариант	X, мкм	C, см ⁻³
1	0,05	1,0×10 ¹⁸	16	0,65	8,5×10 ¹⁸
2	0,10	1,5×10 ¹⁸	17	0,70	9,0×10 ¹⁸
3	0,15	2,0×10 ¹⁸	18	0,70	9,5×10 ¹⁸
4	0,20	2,5×10 ¹⁸	19	0,75	1,0×10 ¹⁹
5	0,25	3,0×10 ¹⁸	20	0,75	1,5×10 ¹⁹
6	0,30	3,5×10 ¹⁸	21	0,80	2,0×10 ¹⁹
7	0,35	4,0×10 ¹⁸	22	0,80	2,5×10 ¹⁹
8	0,40	4,5×10 ¹⁸	23	0,85	3,0×10 ¹⁹
9	0,40	5,0×10 ¹⁸	24	0,85	3,5×10 ¹⁹
10	0,45	5,5×10 ¹⁸	25	0,90	4,0×10 ¹⁹
11	0,50	6,0×10 ¹⁸	26	0,90	4,5×10 ¹⁹
12	0,50	6,5×10 ¹⁸	27	0,95	5,0×10 ¹⁹
13	0,55	7,0×10 ¹⁸	28	0,95	5,5×10 ¹⁹
14	0,55	7,5×10 ¹⁸	29	1,0	6,0×10 ¹⁹
15	0,60	8,0×10 ¹⁸	30	1,0	6,5×10 ¹⁹

Решение

$$C(SiO_2) = \rho(SiO_2) / (M_r \cdot D) = 2,65 \text{ г/см}^3 / (60 \text{ у.е.} \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ г}) = 2,66 \cdot 10^{-22} \text{ см}^{-3}$$

$$\mu = C(Cl) / (3 \cdot C(SiO_2)) = 3,5 \cdot 10^{19} / (3 \cdot 2,66 \cdot 10^{22}) \cdot 100\% = 0,044\%$$

Рисунок 8. Интерфейс программного продукта

Таблица 6

Результаты вычислений

Вариант	X, мкм	C, см ⁻³	Cl, %	Вариант	X, мкм	C, см ⁻³	Cl, %
1	0,05	0,1	0,001	16	0,65	0,85	0,011
2	0,1	0,15	0,002	17	0,7	0,9	0,011
3	0,15	0,2	0,003	18	0,7	0,95	0,012
4	0,2	0,25	0,003	19	0,75	1	0,013
5	0,25	0,3	0,004	20	0,75	1,5	0,019
6	0,3	0,35	0,004	21	0,8	2	0,025
7	0,35	0,4	0,005	22	0,8	2,5	0,031
8	0,4	0,45	0,006	23	0,85	3	0,038
9	0,4	0,5	0,006	24	0,85	3,5	0,044
10	0,45	0,55	0,007	25	0,9	4	0,05
11	0,5	0,6	0,008	26	0,9	4,5	0,056
12	0,5	0,65	0,008	27	0,95	5	0,063
13	0,55	0,7	0,009	28	0,95	5,5	0,069
14	0,55	0,75	0,009	29	1	6	0,075
15	0,6	0,8	0,01	30	1	6,5	0,081

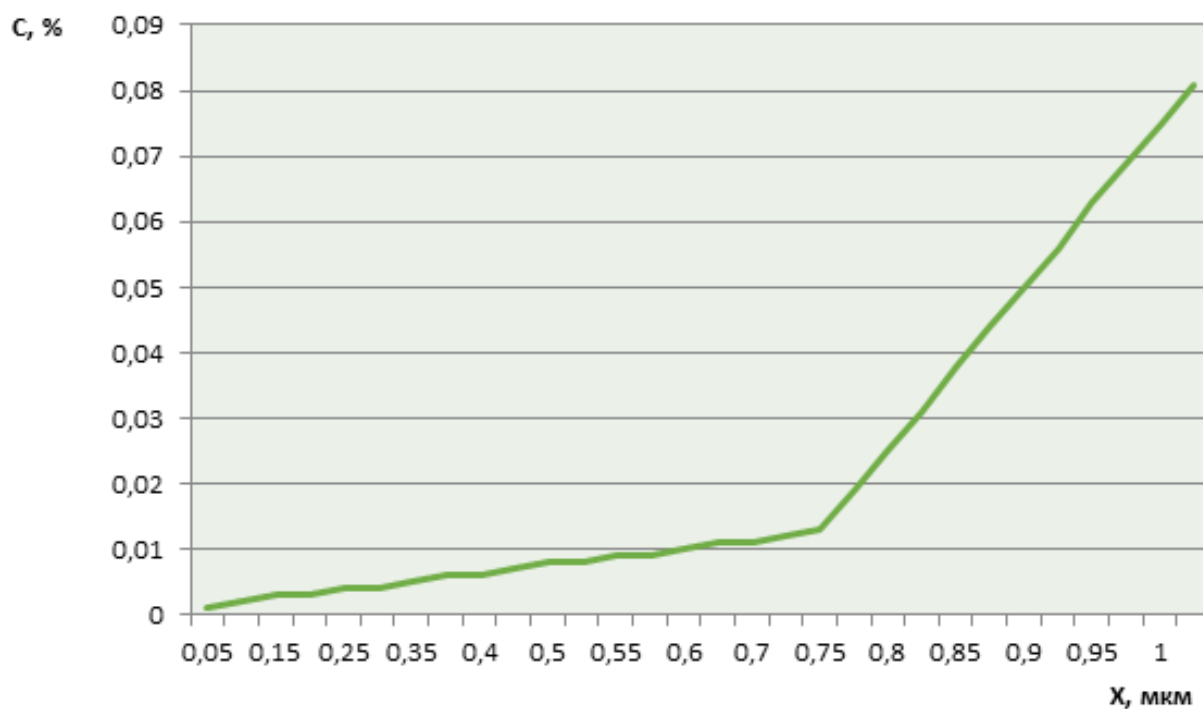


Рисунок 9. Зависимость содержания (C) хлора от толщины (X) пленки

Практическая работа «Исследование процессов окисления». Цель: разработать компьютерную программу для изучения процесса окисления. Получить зависимость толщины выращенной пленки SiO₂ от времени проведения процесса. Используя уравнение $d_0^2 + Ad_0 = B(t + \tau)$ и данные таблицы 8, определить время выращивания плёнки SiO₂ толщиной X мкм при температуре T °C и давлении паров воды Y МПа. В таблице 7 представлены 30 вариантов для работы. Определена математическая модель технологического процесса. Используются расчетные формулы для нахождения времени:

$$t = \frac{(d_0^2 + A \times d_0)}{B},$$

где d_0 – толщина пленки, B – параболическая константа скорости окисления, B/A – линейная константа скорости окисления.

Разработан интерфейс (рисунок 10) и программное обеспечение для автоматизации процесса вычисления. Результаты вычислений представлены в таблице 9. Установлена корреляция толщины пленки SiO₂ и времени проведения процесса (рисунок 11).

Таблица 7

Исходные данные для выполнения работы

Вариант	X, мкм	T, °C	Y, МПа	Вариант	X, мкм	T, °C	Y, МПа
1	0,5	920	0,50	16	1,7	960	0,34
2	0,5	920	0,44	17	1,8	960	0,33
3	0,6	925	0,48	18	1,9	965	0,32
4	0,6	925	0,47	19	1,9	965	0,31
5	0,7	930	0,46	20	2,0	970	0,30
6	0,8	930	0,45	21	2,1	970	0,29
7	0,9	935	0,44	22	2,2	975	0,28
8	0,9	940	0,43	23	2,3	975	0,27
9	1,0	940	0,42	24	2,3	980	0,26
10	1,1	945	0,41	25	2,4	980	0,25
11	1,2	945	0,40	26	2,5	985	0,24
12	1,3	950	0,39	27	2,6	995	0,23
13	1,4	950	0,38	28	2,7	995	0,22
14	1,5	955	0,36	29	2,7	1000	0,21
15	1,6	955	0,35	30	2,8	1050	0,20

Таблица 8

Вспомогательные данные для выполнения работы

Температура окисления, °C	A, мкм	Параболическая константа скорости окисления B, мм ² /ч	Линейная константа скорости окисления B/A, мкм/ч
1200	0,05	0,720	14,40
1100	0,11	0,510	4,64
1000	0,226	0,287	1,27
920	0,50	0,203	0,406

Таблица 9

Результаты вычислений

Вариант	X, мкм	T, °C	Y, МПа	t, ч	Вариант	X, мкм	T, °C	Y, МПа	t, ч
1	0,5	920	0,5	2,46	16	1,7	960	0,34	11,41
2	0,5	920	0,44	2,46	17	1,8	960	0,33	12,71
3	0,6	925	0,48	1,73	18	1,9	965	0,32	14,07
4	0,6	925	0,47	1,73	19	1,9	965	0,31	14,07
5	0,7	930	0,46	2,26	20	2	970	0,3	15,51
6	0,8	930	0,45	2,86	21	2,1	970	0,29	17,02
7	0,9	935	0,44	3,53	22	2,2	975	0,28	18,06
8	0,9	940	0,43	3,53	23	2,3	975	0,27	20,24
9	1	940	0,42	4,27	24	2,3	980	0,26	20,24
10	1,1	945	0,41	5,08	25	2,4	980	0,25	21,96
11	1,2	945	0,4	5,96	26	2,5	985	0,24	23,75
12	1,3	950	0,39	6,91	27	2,6	995	0,23	25,6
13	1,4	950	0,38	7,93	28	2,7	995	0,22	27,53
14	1,5	955	0,36	9,02	29	2,7	1000	0,21	27,53
15	1,6	955	0,35	10,18	30	2,8	1050	0,2	15,96

Температура, С

Толщина пленки, мк

Давление паров воды МПа

Решение

$A = 0,226 \text{ мкм}$ $B = 0,287 \text{ мкм}^2/\text{ч}$

$X^2 + AX = Bt$

$t = (X^2 + AX)/B$

Время для выращивания, ч 20,24

Рисунок 10. Интерфейс программного продукта

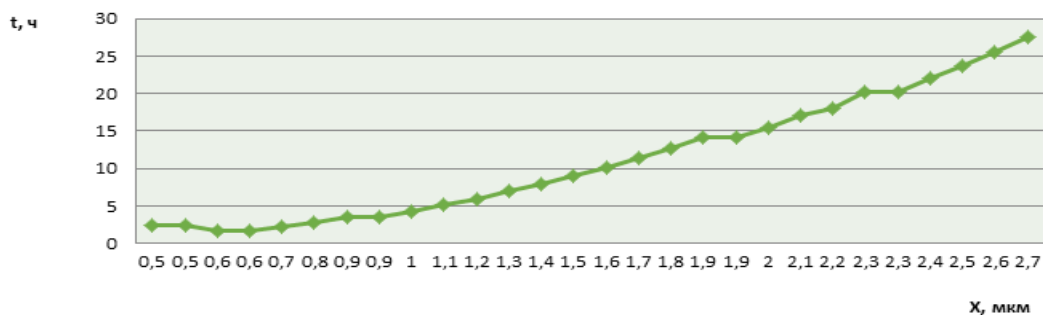


Рисунок 11. Корреляция толщины (X) пленки SiO₂ и времени (t) процесса

Практическая работа «Исследование процессов ионной имплантации». Цель: создать компьютерную программу для анализа характеристик процесса ионной имплантации. Построить график зависимости дозы от времени ионной имплантации. Определить время процесса, необходимое для ионной имплантации с дозой $Z \text{ см}^{-2}$ для однократно ионизированных моноатомных частиц, где ионный пучок с величиной тока $X \text{ мкА}$ имеет полу угловое расхождение C° после прохождения квадратной апертурой диафрагмы (8x8 см), расположенной на расстоянии $Y \text{ см}$ от мишени. Исходные данные для 30 вариантов представлены в таблице 10. Определена математическая модель технологического процесса. Используются расчетные формулы для нахождения времени ионной имплантации:

$$t = \frac{Z \times q \times S}{I} = \frac{Z \times q \times (2 \times Y \times \text{tg}\alpha + a)}{I},$$

где I – величина тока ионного пучка, q – заряд электрона, Y – расстояние от мишени, Z – доза для однократно ионизированных моноатомных частиц, α – полу угловое расхождение, a – апертура диафрагмы.

Разработан интерфейс (рисунок 12) и программное обеспечение для автоматизации процесса вычислений. Результаты вычислений представлены в таблице 11. Построен график корреляции дозы и времени ионной имплантации (рисунок 13).

Таблица 10

Исходные данные для выполнения работы

Вариант	X, мкА	C, °	Y, см	$Z \times 10^{13}, \text{см}^{-2}$	Вариант	X, мкА	C, °	Y, см	$Z \times 10^{13}, \text{см}^{-2}$
1	10	10	6,0	1,0	16	28	23	9,2	5,1
2	12	11	5,0	1,3	17	32	22	7,5	4,3
3	15	9	5,5	1,5	18	39	29	11,6	4,9
4	11	13	4,2	1,7	19	31	26	12,3	4,7
5	16	15	7,0	1,9	20	37	28	15,6	5,3
6	14	12	9,1	2,1	21	40	27	14,8	5,5
7	18	14	8,1	2,9	22	35	30	15,0	5,9
8	20	20	8,7	2,3	23	45	39	16,3	6,3
9	21	17	9,6	3,1	24	39	35	12,8	6,7
10	19	16	5,5	2,7	25	41	31	11,9	6,1
11	25	19	10,2	2,5	26	33	34	10,8	7,3
12	23	20	11,0	3,3	27	47	38	9,0	7,5
13	29	25	4,7	3,5	28	34	37	5,9	7,1
14	24	24	6,8	3,9	29	49	36	6,7	7,9
15	30	21	3,6	4,5	30	50	32	6,3	6,5

Таблица 11

Результаты вычислений

Вариант	t, с	Вариант	t, с
1	168,11	16	479,41
2	179,01	17	314,41
3	161,87	18	436,73
4	255,8	19	505,12
5	232,05	20	587,11
6	296,04	21	528,93
7	322,56	22	711,59
8	274,3	23	803,88
9	340,67	24	742,79
10	263,53	25	553,02
11	250,06	26	832,34
12	382,33	27	587,09
13	248,61	28	587,71
14	380,09	29	476,46
15	268,41	30	343,64

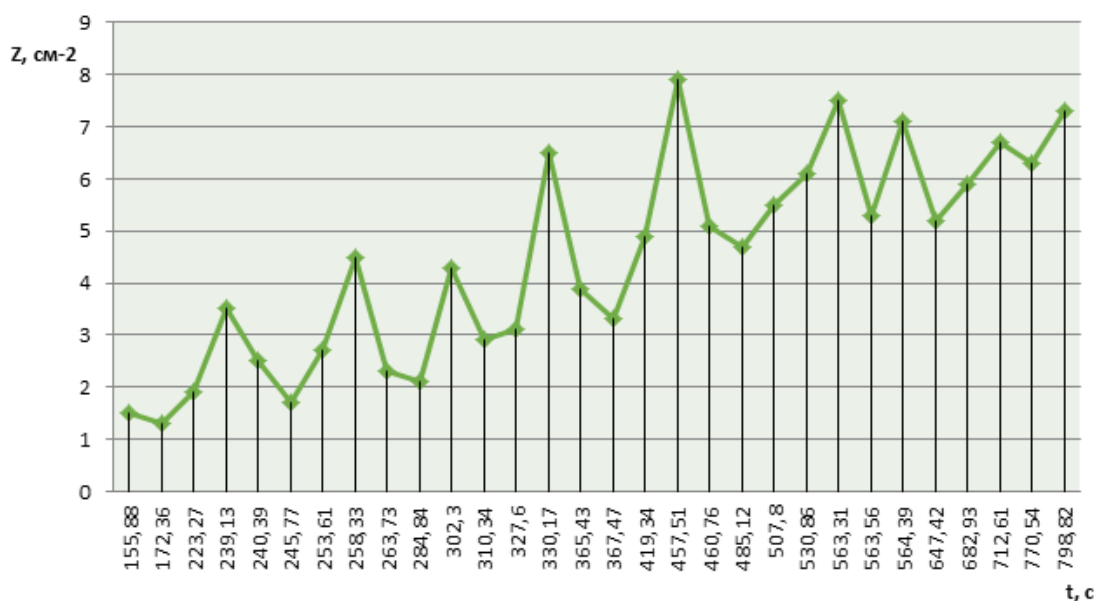


Рисунок 12. Корреляция дозы (Z) и времени (t) процесса ионной имплантации

Практическая работа «Исследование процесса литографии». Цель: создать компьютерную программу для анализа основных характеристик процесса литографии. Определить зависимость толщины металлического слоя на шаблоне от экспонирующего излучения. Построить график зависимости минимальной толщины слоя золота от длины волны. Определить минимальную толщину слоя золота на шаблоне для рентгеновской литографии, где для формирования полезного изображения в резисте перенос модуляции шаблона на рентгеновский резист равен или больше X, при экспонирующем излучении с длиной волны Y нм. Исходные данные для 30 вариантов представлены в таблице 12. Определена математическая модель технологического процесса. Используются расчетные формулы для нахождения толщины золота на шаблоне:

$$t = \frac{1}{k} \times \ln 10,$$

где k – коэффициент поглощения, зависящий от длины волны экспонирующего излучения.

Разработан интерфейс (рисунок 14) и программное обеспечение для автоматизации процесса вычислений. Результаты вычислений представлены в таблице 13. Построен график зависимости минимальной толщины слоя золота на шаблоне от длины волны (рисунок 15).

Таблица 12

Исходные данные для выполнения работы

Вариант	X	Y, нм	Вариант	X	Y, нм
1	0,1	0,1	16	1,6	2,7
2	0,2	0,3	17	1,7	2,9
3	0,3	0,5	18	1,8	3,0
4	0,4	0,7	19	1,9	3,1
5	0,5	0,9	20	2,0	3,3
6	0,6	1,0	21	2,1	3,5
7	0,7	1,1	22	2,2	3,7
8	0,8	1,3	23	2,3	3,9
9	0,9	1,5	24	2,4	4,0
10	1,0	1,7	25	2,5	4,1
11	1,1	1,9	26	2,6	4,3
12	1,2	2,0	27	2,7	4,5
13	1,3	2,1	28	2,8	4,7
14	1,4	2,3	29	2,9	4,9
15	1,5	2,5	30	3,0	5,0

Таблица 13

Результаты вычислений

Вариант	Y, нм	h, мкм	Вариант	Y, нм	h, мкм
1	0,1	2,303	16	2,7	0,162
2	0,3	1,151	17	2,9	0,161
3	0,5	0,306	18	3	0,161
4	0,7	0,461	19	3,1	0,162
5	0,9	0,329	20	3,3	0,16
6	1	0,23	21	3,5	0,159
7	1,1	0,209	22	3,7	0,156
8	1,3	0,201	23	3,9	0,154
9	1,5	0,192	24	4	0,155
10	1,7	0,177	25	4,1	0,157
11	1,9	0,164	26	4,3	0,158
12	2	0,164	27	4,5	0,156
13	2,1	0,163	28	4,7	0,155
14	2,3	0,1625	29	4,9	0,153
15	2,5	0,162	30	5	0,15

Перенос модуляции
 Длина волны излучения, нм
 Коэффициент поглощения, мкм⁻¹

 Толщина слоя золота, мкм

$$M_{\text{шабл}} = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}$$

$$I = I_0 e^{-kt} \quad \text{КПД} = \frac{I}{I_0} = 10\%$$

$$\frac{I}{I_0} = e^{-kt}$$

$$\ln \frac{I}{I_0} = -kt \quad t = \frac{1}{k} \ln \frac{I_0}{I}$$

$$t = -\frac{1}{k} \ln \frac{I}{I_0}$$

Рисунок 14. Интерфейс программного продукта

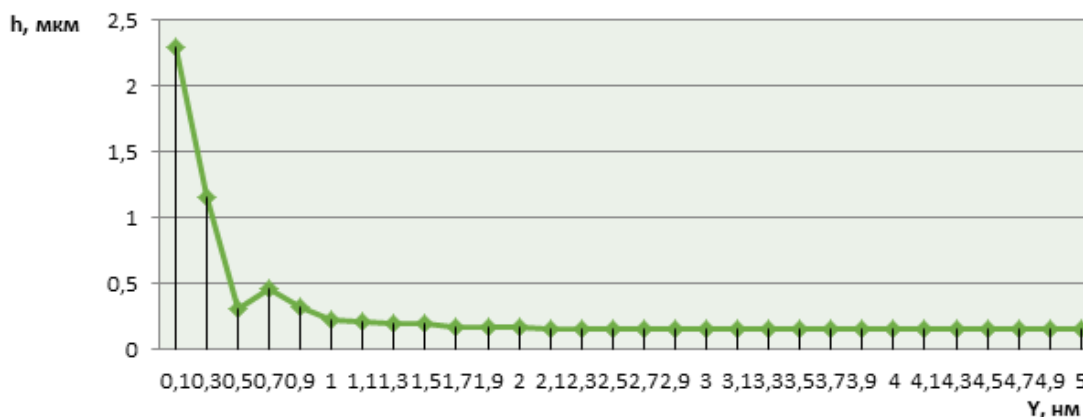


Рисунок 15. Зависимость толщины слоя золота (h) на шаблоне от длины волны (λ)

Практическая работа «Интеграция технологических процессов изготовления микроизделий». Цель: создать компьютерную программу для анализа зависимостей изменения величины порогового напряжения ΔV_t от смещения на подложке V_{BS} для полевых МОП-транзисторов с толщиной подзатворного окисла 35 нм, сформированных на однородно легированных подложках. Построить график зависимости величины порогового напряжения от уровня легирования. Исходные данные для 30 вариантов представлены в таблице 14. Определена математическая модель технологического процесса. Используются расчетные формулы для нахождения порогового напряжения:

$$\Delta V_t = \frac{d}{\epsilon_0} \times \sqrt{2q\epsilon_s N_A} \times \left(\sqrt{(2\phi_B + V_{BS}) \times (1 - e^{-\beta \times (2\phi_B + V_{BS})})} - \sqrt{(2\phi_B + V_{2BS}) \times (1 - e^{-\beta \times (2\phi_B + V_{2BS})})} \right),$$

где d – толщина подзатворного окисла, ϵ_0 – электрическая постоянная, q – заряд электрона, N_A – постоянная Авогадро, V_{BS} – смещение на подложке.

Разработан интерфейс (рисунок 16) и программное обеспечение для автоматизации процесса вычислений. Результаты вычислений представлены в таблице 15. Построен график зависимости величины порогового напряжения от уровня легирования (рисунок 17).

Таблица 14

Исходные данные для выполнения работы

Вариант	L, см ⁻³	Вариант	L, см ⁻³
1	1×10 ¹⁵	16	1×10 ¹⁶
2	2×10 ¹⁵	17	2×10 ¹⁶
3	4×10 ¹⁵	18	4×10 ¹⁶
4	6×10 ¹⁵	19	6×10 ¹⁶
5	8×10 ¹⁵	20	8×10 ¹⁶
6	1×10 ¹⁶	21	1×10 ¹⁵
7	2×10 ¹⁶	22	2×10 ¹⁵
8	4×10 ¹⁶	23	4×10 ¹⁵
9	6×10 ¹⁶	24	6×10 ¹⁵
10	8×10 ¹⁶	25	8×10 ¹⁵
11	1×10 ¹⁵	26	1×10 ¹⁶
12	2×10 ¹⁵	27	2×10 ¹⁶
13	4×10 ¹⁵	28	4×10 ¹⁶
14	6×10 ¹⁵	29	6×10 ¹⁶
15	8×10 ¹⁵	30	8×10 ¹⁶

Таблица 15

Результаты вычислений

Вариант	L, см ⁻³	ΔV _T , мВ	Вариант	L, см ⁻³	ΔV _T , мВ
1	1×10 ¹⁵	1014,269196	16	1×10 ¹⁶	1014,388355
2	2×10 ¹⁵	1014,305067	17	2×10 ¹⁶	1014,424225
3	4×10 ¹⁵	1014,340937	18	4×10 ¹⁶	1014,460096
4	6×10 ¹⁵	1014,36192	19	6×10 ¹⁶	1014,481079
5	8×10 ¹⁵	1014,36192	20	8×10 ¹⁶	1014,495966
6	1×10 ¹⁶	1014,388355	21	1×10 ¹⁵	1014,269196
7	2×10 ¹⁶	1014,424225	22	2×10 ¹⁵	1014,305067
8	4×10 ¹⁶	1014,460096	23	4×10 ¹⁵	1014,340937
9	6×10 ¹⁶	1014,481079	24	6×10 ¹⁵	1014,36192
10	8×10 ¹⁶	1014,495966	25	8×10 ¹⁵	1014,36192
11	1×10 ¹⁵	1014,269196	26	1×10 ¹⁶	1014,388355
12	2×10 ¹⁵	1014,305067	27	2×10 ¹⁶	1014,424225
13	4×10 ¹⁵	1014,340937	28	4×10 ¹⁶	1014,460096
14	6×10 ¹⁵	1014,36192	29	6×10 ¹⁶	1014,481079
15	8×10 ¹⁵	1014,36192	30	8×10 ¹⁶	1014,495966

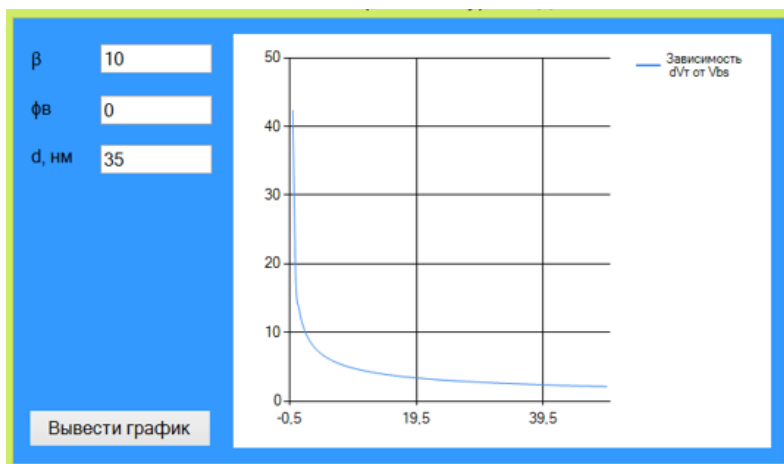


Рисунок 16. Интерфейс программного продукта

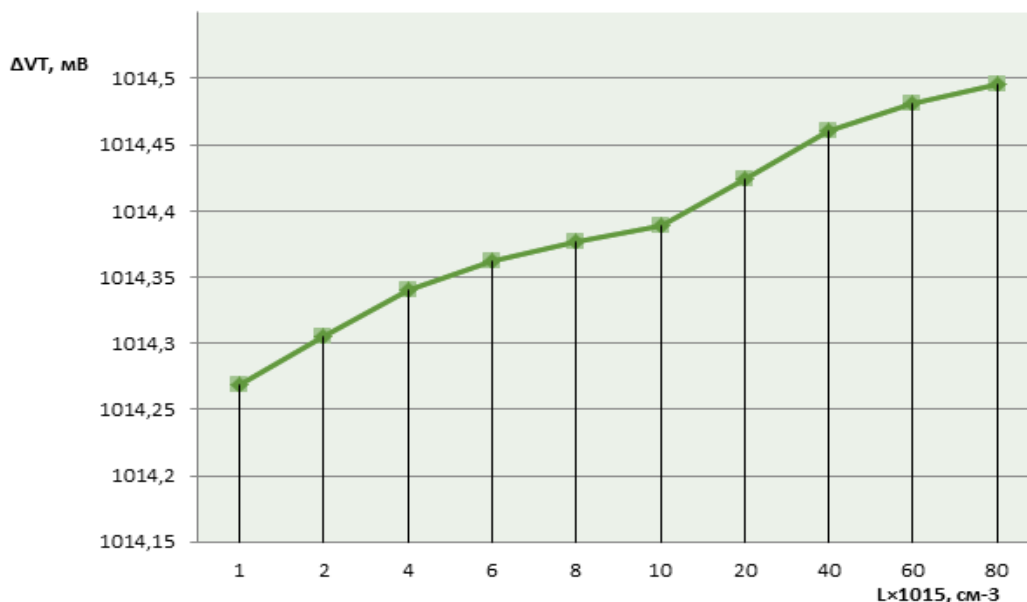


Рисунок 17. Зависимость величины порогового напряжения (ΔV_T) от уровня легирования (L)

Практическая работа «Исследование упругих элементов микроизделий». Цель: создать компьютерную программу для анализа зависимости изменения компонент тензоров напряжения и прогиба от координат. Построить график зависимости величины прогиба от толщины пластины. Определить компоненты тензора напряжений и прогиб на краю верхней поверхности упругой круглой пластины, шириной h м и радиусом R м на которую действует равномерно распределенное давление q Па. Для нечетных вариантов плоскость пластины совпадает с кристаллографической плоскостью (111), для четных вариантов – с плоскостью (100). Построить зависимость прогиба в центре упругой круглой пластины w_0 от равномерно приложенного напряжения q . Исходные данные для 30 вариантов представлены в таблице 16. Определена математическая модель технологического процесса. Используются расчетные формулы для нахождения величины прогиба w_0 :

$$w_0 = - \frac{m \times |q| \times R^4}{h^3},$$

где m – коэффициент, зависящий от плоскости (111) либо (100), q – равномерно распределенное давление, R – радиус пластины, h – ширина пластины.

Разработан интерфейс (рисунок 18) и программное обеспечение для автоматизации процесса вычислений. Результаты вычислений представлены в таблице 17. Построен график зависимости величины прогиба от толщины пластины (рисунок 19).

Таблица 16

Исходные данные для выполнения работы

Вариант	$h \times 10^{-6}$, м	$R \times 10^{-3}$, м	$q \times 10^5$, Па	Вариант	$h \times 10^{-6}$, м	$R \times 10^{-3}$, м	$q \times 10^5$, Па
1	11	2,0	0,25	16	26	3,5	4,25
2	12	1,5	0,5	17	27	4,5	4,5
3	13	0,75	1,0	18	28	3,25	4,75
4	14	0,5	1,25	19	29	3,0	5,0
5	15	2,5	1,5	20	30	1,0	5,25
6	16	3,5	1,75	21	31	1,35	5,5
7	17	2,05	2,0	22	32	3,05	5,75
8	18	2,75	2,25	23	33	4,45	6,0
9	19	1,75	2,5	24	34	4,85	6,25
10	20	1,25	2,75	25	35	4,15	6,5
11	21	1,55	3,0	26	36	1,05	6,75
12	22	0,65	3,25	27	37	5,0	7,0
13	23	0,95	3,5	28	38	5,25	7,25
14	24	2,35	3,75	29	39	5,35	7,5
15	25	2,85	4,0	30	40	5,95	7,75

Таблица 17

Результаты вычислений

Вариант	$w_0 \times 10^{-6}$, м	Вариант	$w_0 \times 10^{-6}$, м
1	-309,542	16	-4390,626
2	-177,246	17	-9656,250
3	-14,834	18	-2921,046
4	-3,445	19	-1710,402
5	-1788,194	20	-23,528
6	-7757,748	21	-63,161
7	-740,518	22	-1837,395
8	-2669,815	23	-6743,521
9	-352,102	24	-10646,224
10	-101,547	25	-4631,683
11	-192,587	26	-21,278
12	-6,593	27	-8896,314
13	-24,133	28	-12145,343
14	-1001,047	29	-10668,904
15	-1739,629	30	-18364,325

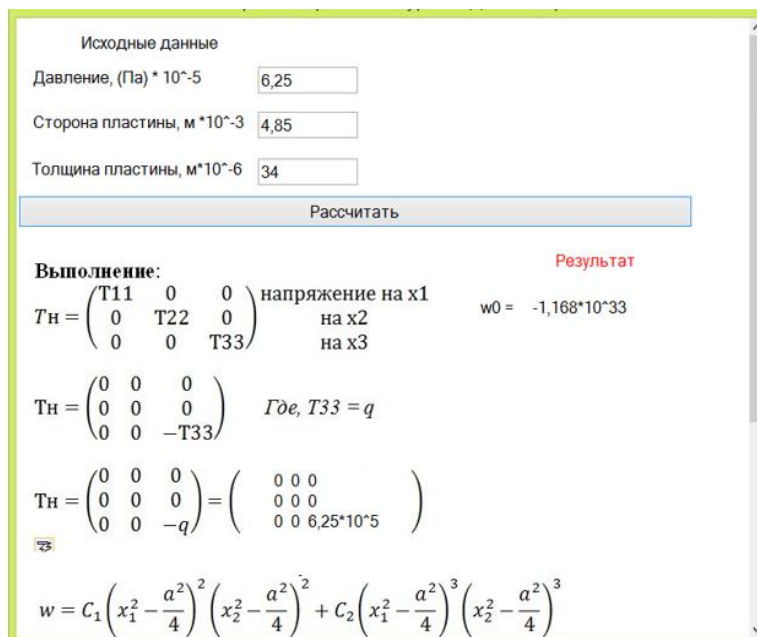


Рисунок 18. Интерфейс программного продукта

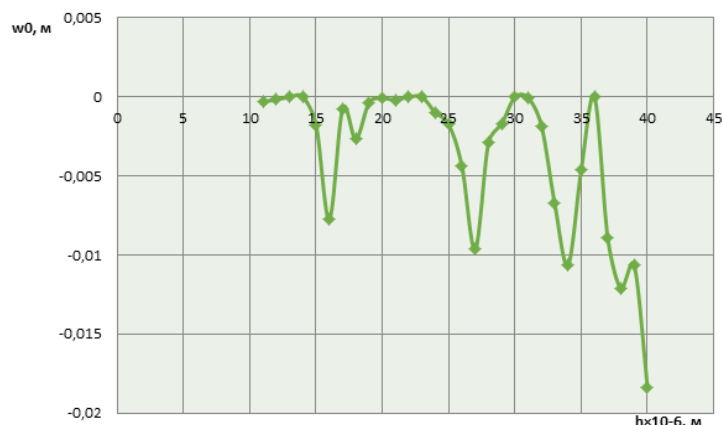


Рисунок 19. Зависимость величины прогиба (w_0) от толщины пластины (h)

Заключение и перспективы развития. Разработаны и апробированы со студентами третьего курса 16 практических работ по изучению микросистемных технологий. Часть работ представлена в этой статье. К каждому заданию имеется разработанная компьютерная программа, которая обеспечивает расчет параметров исследуемого процесса. Это позволяет сформировать компетенции, необходимые специалистам, которые представлены в образовательном стандарте специальности ОСВО 1-58 01 01-2013: работа с технической литературой, справочными материалами и другими информационными источниками, проведение системного анализа и определение требований к информационным системам, проектирование программных средств.

Это позволит, в перспективе, перейти к обучению студентов приемам проведения оценок коэффициентов корреляции между параметрами технологических процессов. Кроме того, это позволит обучить студентов приемам обработки и анализа больших массивов технологических параметров крупных производств – цехов, заводов и фабрик.

Литература

- [1] M. Batura, S.K. Dzik, B. Zibitsker, D. Likhachevsky, I. Tsyrelchuk, K. Yashin. Experience in organizing educational process in big data analytics at bsuir//BIG DATA and Advanced Analytics: collection of materials of the third international scientific and practical conference, Minsk, Belarus. May 3–4, 2017. P. 119 – 126.
- [2] М.А. Амелин. Опыт преподавания дисциплины алгоритмы машинного обучения в вузе// BIG DATA and Advanced Analytics: collection of materials of the third international scientific and practical conference, Minsk, Belarus. May 3–4, 2017. С. 221 – 228.
- [3] В.С. Дроздов. BIG DATA аналитика и ее применение// BIG DATA and Advanced Analytics: collection of materials of the third international scientific and practical conference, Minsk, Belarus. May 3–4, 2017. С. 232-237.
- [4] В.С. Дроздов, Д.В. Лихачевский, Е.А. Мельникова, В.С. Осипович, Н.В.Щербина, К.Д.Яшин. Платформа R-studio для анализа больших данных// BIG DATA and Advanced Analytics: collection of materials of the fourth international scientific and practical conference, Minsk, Belarus. May 3–4, 2018. С. 108 – 120.
- [5] Осипович В. С., Яшин К. Д.: Микрокосмические аппараты и квантовые ключи. // Нано- и микросистемная техника, №7, 2006, стр. 5-11.
- [6] Осипович В. С., Яшин К. Д.: Микрокосмический аппарат дистанционного зондирования Земли. // Материалы III Белорусского космического конгресса, 2007, Минск, ОИПИ НАН Беларуси, стр. 188-193.
- [7] Золотой С. А., Осипович В. С., Яшин К. Д.: Квантовые микросистемы. // Нано- и микросистемная техника, №2, 2007, стр. 62-67.
- [8] Осипович В. С., Яшин К. Д. и др.: Современные разработки МЭМС. // Нано- и микросистемная техника, №5, 2008, стр. 57-64.
- [9] Осипович В. С., Меденко П. В., Яшин К. Д.: Микросистемная техника для космических аппаратов. // Нано- и микросистемная техника, №4, 2009, стр. 38-42.
- [10] Осипович В. С., Терпинская Т. И., Яшин К. Д. и др.: Нанобиополупроводниковая система визуализации клеток. // Нано- и микросистемная техника, №12, 2008, стр. 48-52.
- [11] Терпинская Т. И., Осипович В. С., Яшин К. Д.: Технология создания медицинской нанобиоинформационной диагностической системы. // Нано- и микросистемная техника, №4, 2012, стр. 11-14.Т
- [12] Осипович В. С., Терпинская Т. И., Яшин К. Д.: Нанотехнологии для медицинской диагностики. // Рецепт, №3, 2009, стр. 142-146.
- [13] Осипович В. С., Логин В. М., Яшин К. Д.: Применение МЭМС в медицинской электронике. // Рецепт, №1, 2009, стр. 146-150.
- [14] Технология СБИС: В 2-х кн. Кн.1. Пер. с англ./Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – 404 с., ил.
- [15] Технология СБИС: В 2-х кн. Кн.2. Пер. с англ./Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – 453 с., ил.
- [16] Физика полупроводниковых приборов: В 2-х кн. Кн.1. Пер. с англ./Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1984. – 456 с., ил.
- [17] Физика полупроводниковых приборов: В 2-х кн. Кн.2. Пер. с англ./Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1984. – 456 с., ил.

THE SYSTEM APPROACH TO ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF PRODUCTION OF THE MICROSYSTEM EQUIPMENT

V.S. DROZDOV

Assistant of the department of Human Engineering and Ergonomics BSUIR, Master of Technical Sciences

K.D.YASHIN, PHD

Head of the Department of Engineering Psychology and Ergonomics BSUIR

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus
E-mail: kafipie@bsuir.by*

Abstract. Practical works and results of their execution are presented. In each practical work there is an individual task for students: development of computer programs which will calculate key parameters. Creation of the dependences in the form of diagrams and charts are provided.

Keywords: analysis, microsystem technologies, diagram, training, design, correlation, program.