

НИИМЭ
НИИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ

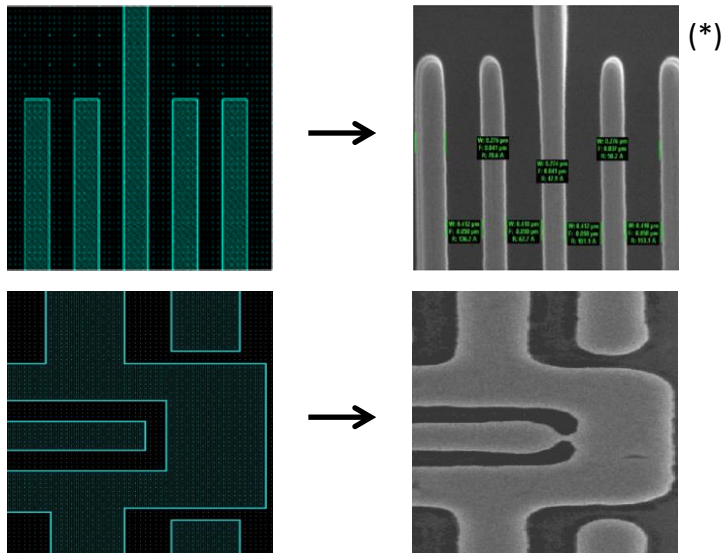
АО «Научно-исследовательский
институт молекулярной
электроники»

Алгоритм и методика повышения эффективности ОРС-рецепта

Медведев К.А., Кузовков А. В., Иванов В.В.

Проблемы современной фотолитографии

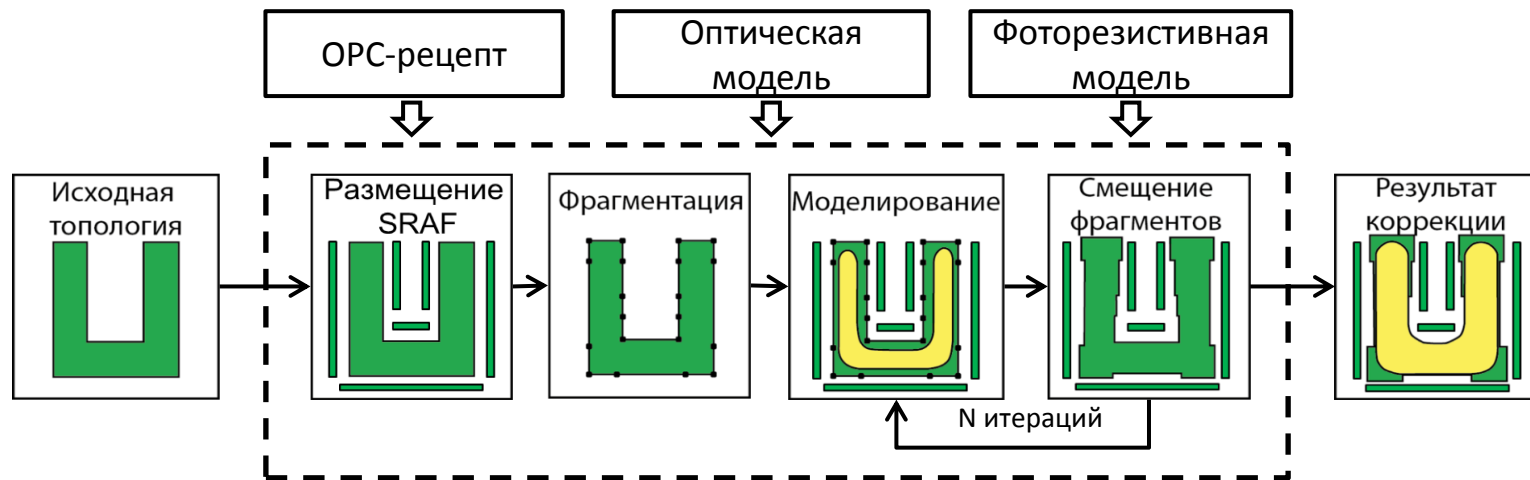
Эффекты оптической близости – искажение исходного топологического рисунка при переносе на пластину в процессе фотолитографии вследствие дифракционных эффектов и специфики рассеивания электронов.



* Источник: И. А. Родионов, В.В. Макаrchук «Коррекция оптических эффектов близости при проектировании микросхем»

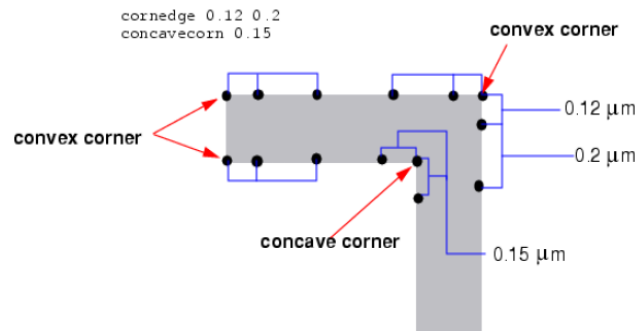
Популярные методы повышения разрешения фотолитографии (RET)	
Использование внеосевого освещения фотошаблона (OAI).	Illumination shapes Dipol Ring Quadrupol Quasar
Проведение коррекции эффектов оптической близости (OPC).	
Использование фазосдвигающих фотошаблонов (PSM).	phase-shifting region
Использование непечатаемых вспомогательных структур (SRAF)	

Применение OPC-рецепта в рамках техники коррекции эффектов оптической близости на основе моделирования



Параметры OPC-рецепта определяют:

- области фрагментации, размеры фрагментов, количество вершин и их расположение;
- позиции контрольных точек для вычисления EPE;
- величину смещения фрагментов по результатам моделирования;
- количество циклов смещения фрагментов.



Проблемная ситуация:

снижение эффективности OPC-рецепта при изменении технологических условий среды его применения.

Причины сложившейся ситуации:

- зависимость эффективности OPC-рецепта от параметров оптической и фоторезистивной моделей, особенностей используемых типовых топологических решений;
- необходимость прецизионной коррекции топологии для борьбы с эффектами оптической близости при освоении новых техпроцессов;
- отсутствие собственных компетенций в области разработки OPC-решений;
- отсутствие собственных методик, алгоритмов и программных средств для калибровки OPC-рецепта.

Цель:

обеспечение точности воспроизведения топологического рисунка на пластине за счет калибровки параметров применяемого OPC-рецепта.

Задачи:

- формализация задачи калибровки OPC-рецепта;
- разработка алгоритма и методики калибровки OPC-рецепта;
- разработка программного средства для калибровки OPC-рецепта с применением предложенного алгоритма;
- экспериментальное исследование эффективности предложенного алгоритма калибровки OPC-рецепта.

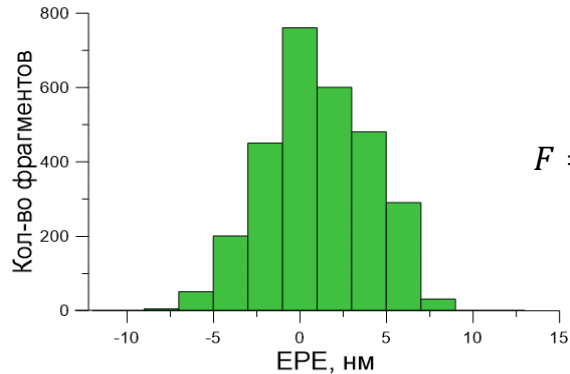
Формализация задачи калибровки OPC-рецепта

$$F(\vec{p}) \rightarrow \min$$
$$\vec{p} = (p_1, p_2, \dots, p_n)$$
$$\vec{p} \in P, P \subset R^n$$

$F(\vec{p})$ - функция оценки эффективности OPC-рецепта;
 $\vec{p}$ - вектор значений калибруемых параметров OPC-рецепта;
 P - множество допустимых значений параметров OPC-рецепта;
 R^n - n-мерное вещественное векторное пространство;
n - количество оптимизируемых параметров OPC-рецепта.

Методики оценки эффективности OPC-рецепта

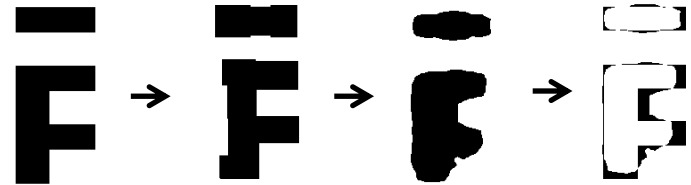
Методика EPE_RMS: анализ распределения величины ошибки размещения смоделированного контура топологических структур



$$F = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k EPE_i^2}$$

Где: k - количество фрагментов; EPE - значение ошибки размещения ребра фрагмента в контрольной точке.

Методика SQUARE : вычисление площади смещения смоделированного топологического рисунка относительно исходной топологии



Топология Коррекция Моделирование Смещение

$$F = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \left| \sum_{j=1}^{k-1} x_{i,j} y_{i,j+1} + x_{i,k} y_{i,1} - \sum_{j=1}^{k-1} x_{i,j+1} y_{i,j} - x_{i,1} y_{i,k} \right|$$

Где: m - количество многоугольников; k - количество вершин многоугольника; x, y - координаты вершин.

Метод дифференциальной эволюции

Преимущества метода:

- не требует вычисления производной целевой функции;
- отсутствуют ограничения на вид целевой функции (дифференцируемость, линейность, унимодальность, размерность вектора решения);
- не требует кодирования переменных;
- способен динамически моделировать особенности рельефа целевой функции;
- прост в реализации и хорошо распараллеливается.

Ключевые параметры метода :

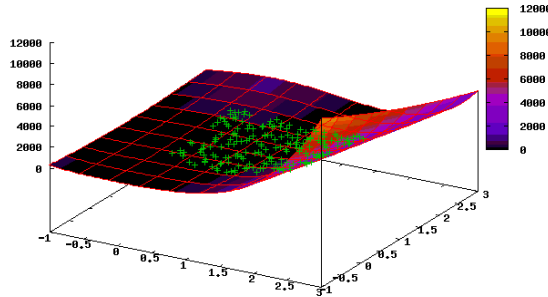
- N – размер популяции. Рекомендуется значение: $Q * n$, где $5 \leq Q \leq 10$, n – количество оптимизируемых параметров;
- M – сила мутации, $0 < M \leq 2$. Более высокое значение расширяет область поиска, меньшее значение обеспечивает уточнение найденного решения.
- P – вероятность скрещивания, $0 < P \leq 1$. Более высокое значение приближает поиск к случайному, меньшее значение делает поиск более конвергентным.

Применение метода на примере минимизации функции Розенброка

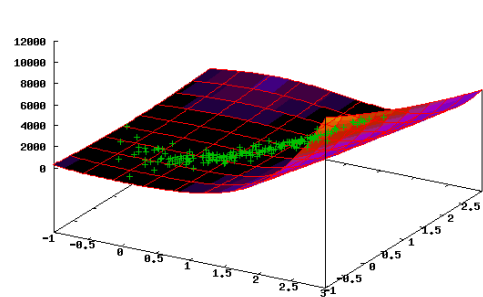
$$f(x, y) = 100(y - x^2)^2 + (1 - x)^2$$

$$0 \leq x, y \leq 2$$

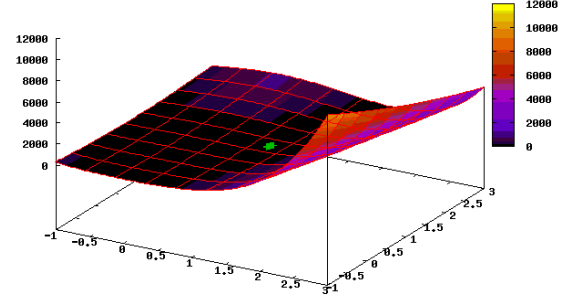
$$\text{глобальный минимум: } f(1, 1) = 0$$



Исходное распределение



Распределение после 15 итераций



Распределение после 35 итераций

Схема алгоритма калибровки OPC-рецепта

Обобщенная схема алгоритма

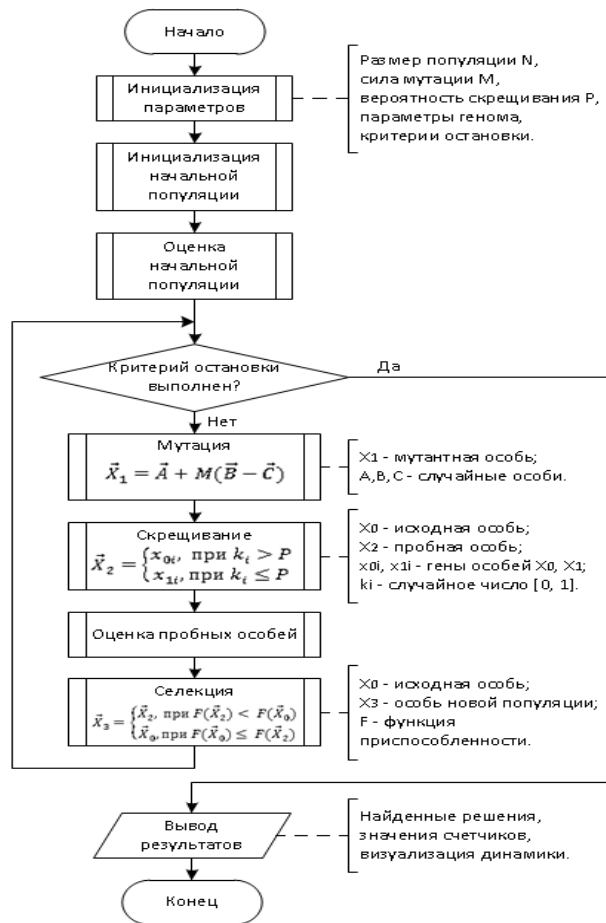
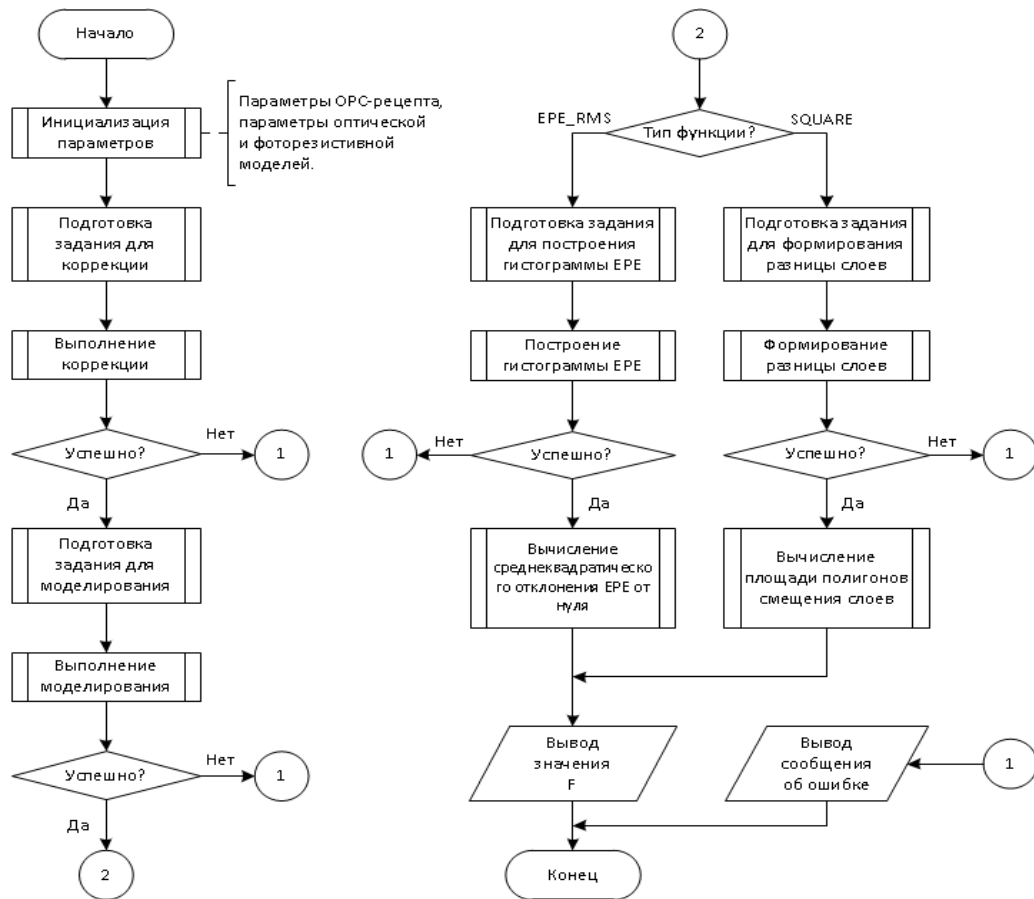


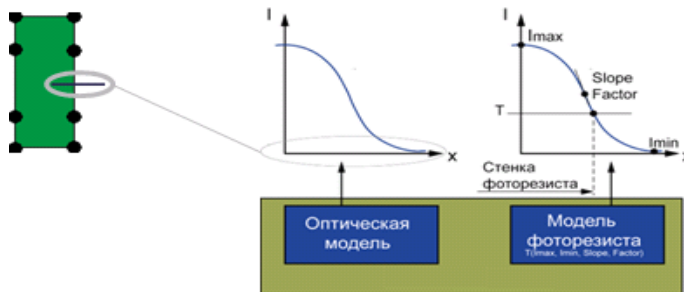
Схема алгоритма оценки особи популяции



Методика калибровки OPC-рецепта

Этап 1. Подготовка входных данных

1. Генерация комплекта тестовых топологий $T = (T_1, \dots, T_m)$ со смешанной и однородной конфигурацией структур.
2. Настройка параметров оптической модели:
 - параметры оптической системы (λ , NA);
 - модель источника излучения (SHARP, ERF, MAP).
3. Подбор коэффициентов $a_0, \dots, a_{34}$ уравнения фоторезистивной модели для вычисления порогового значения интенсивности для фоторезиста:



$$T(I_{max}, I_{min}, Slope, Factor) = a_0 + a_1 I_{max} + a_2 I_{min} + a_3 Slope + a_4 Factor + a_{11} I_{max}^2 + a_{22} I_{min}^2 + a_{33} Slope^2 + a_{44} Factor^2 + a_{12} I_{max} I_{min} + a_{13} I_{max} Slope + a_{14} I_{max} Factor + a_{23} I_{min} Slope + a_{24} I_{min} Factor + a_{34} Slope Factor$$

Этап 2. Выполнение калибровки

1. Настройка параметров алгоритма посредством решения оптимизационной задачи:

$$F(N, M, P) \rightarrow \min \quad \begin{cases} 5n \leq N \leq 10n \\ 0 < M \leq 2 \\ 0 < P \leq 1 \end{cases} \quad \text{где:}$$

N - размер популяции;

M - сила мутации;

P - вероятность скрещивания;

n - количество калибруемых параметров OPC-рецепта;

F - значение эффективности OPC-рецепта полученного после калибровки его параметров.

2. Формирование универсального OPC-рецепта R_U , посредством калибровки его параметров для тестовой топологии T_1 .
3. Формирование набора специфичных OPC-рецептов $R_{S1}, \dots, R_{Sm}$ посредством калибровки его параметров для тестовых топологий $T_1, \dots, T_m$.

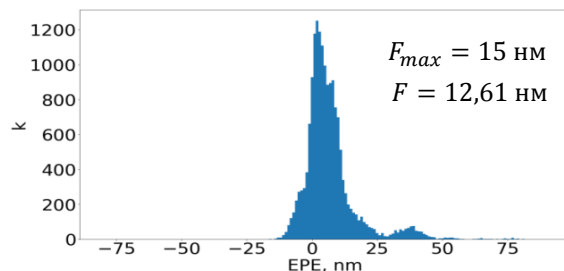
Методика калибровки ОРС-рецепта (продолжение)

Этап 3. Оценка эффективности откалиброванного ОРС-рецепта

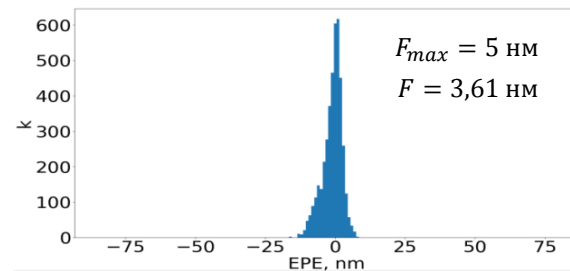
1. Проверка соблюдения допусков на распределение EPE для различных типов топологических областей:

$$F = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k EPE_i^2}$$
$$0 \leq F \leq F_{max}$$

Распределение EPE на внутренних углах



Распределение EPE на внешних углах



2. Оценка прироста эффективности откалиброванных рецептов относительно исходного:

$$E_{Si} = \frac{100(F_i(R_D) - F_i(R_{Si}))}{F_i(R_D)}$$

$$E_{Ui} = \frac{100(F_i(R_D) - F_i(R_U))}{F_i(R_D)}$$

$i = 1, 2, \dots, m$ где:

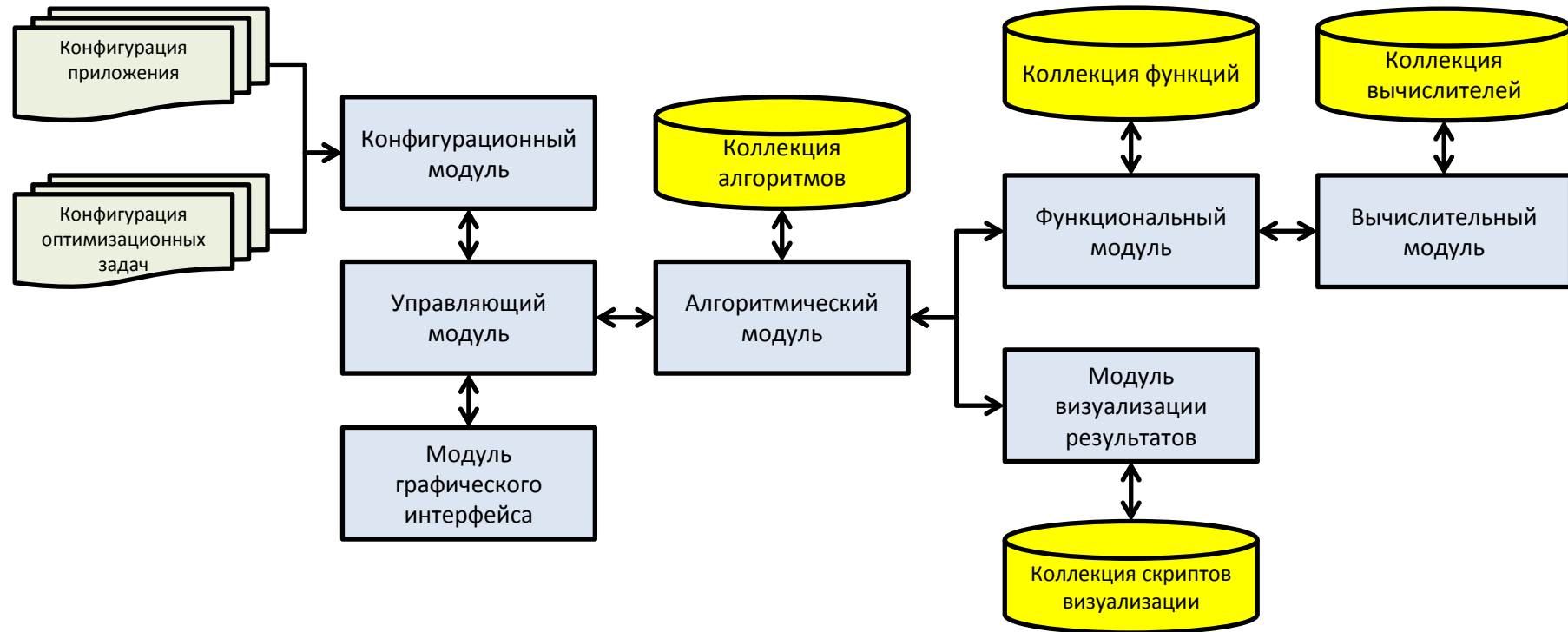
E_S - прирост эффективности специфичного рецепта;
 E_U - прирост эффективности универсального рецепта;
 m - количество тестовых топологий;

$F(R_S)$ - эффективность специфичного рецепта;
 $F(R_U)$ - эффективность универсального рецепта;
 $F(R_D)$ - эффективность исходного рецепта.

3. Оценка целесообразности применения универсального откалиброванного рецепта для топологий с различной конфигурацией структур, т.е. проверка выполнения условия:

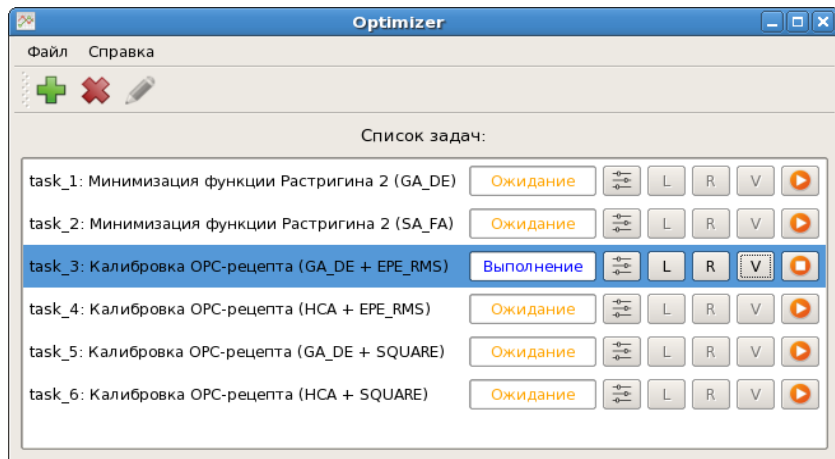
$$|E_{Si} - E_{Ui}| \leq 5\%$$

Структурная схема программного средства для калибровки ОРС-рецепта

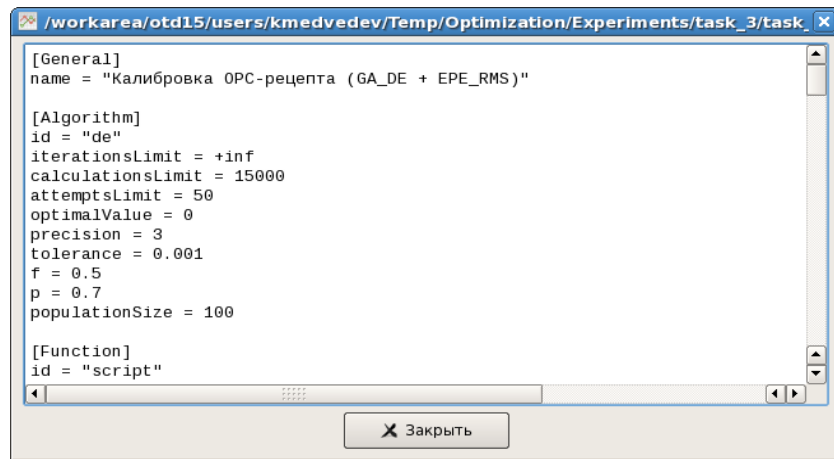


Программное средство для калибровки OPC-рецепта

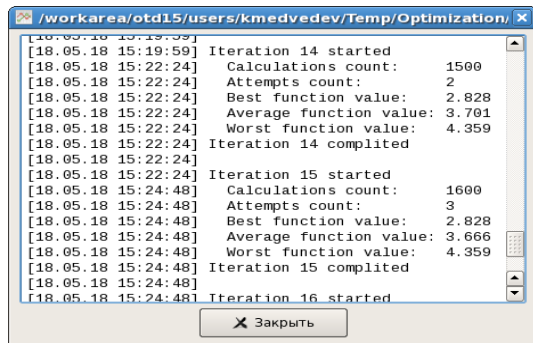
Интерфейс главного окна



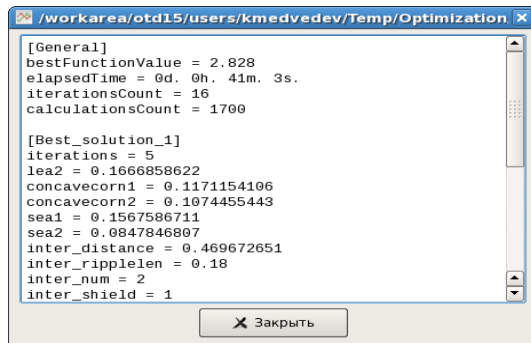
Интерфейс просмотра конфигурации задачи



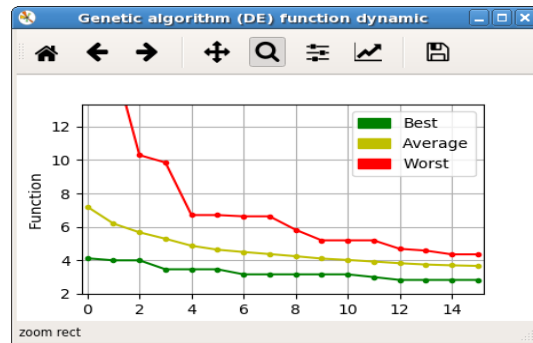
Интерфейс просмотра лога выполнения



Интерфейс просмотра текущих результатов



Интерфейс визуализации динамики



Экспериментальное исследование эффективности алгоритма калибровки ОРС-рецепта

Комплект тестовых топологий



Результаты исследования

Настройка параметров
алгоритма

№	T	N	M	P	F, нм
1	T1	100	2	1	8,185
2	T1	100	1	0,7	7,616
3	T1	100	0,5	0,7	7,55
4	T1	100	0,3	0,3	7,55
5	T1	200	1	1	7,59
6	T1	200	0,5	0,7	7,55
7	T1	200	0,3	0,3	7,55

Калибровка рецепта
с методикой оценки EMP_RMS

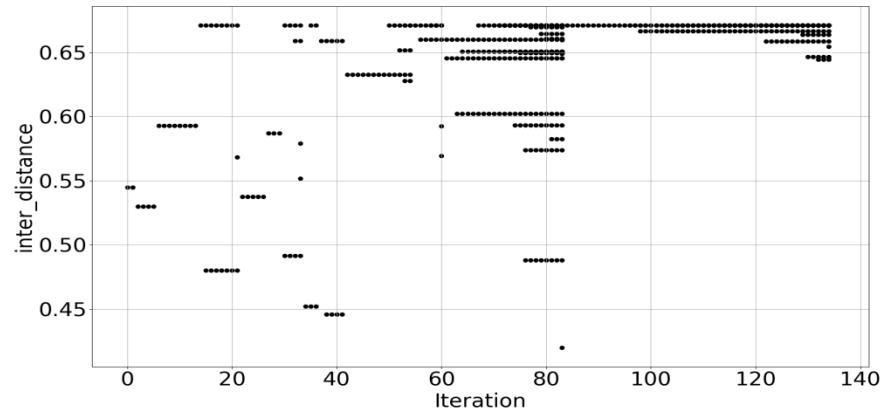
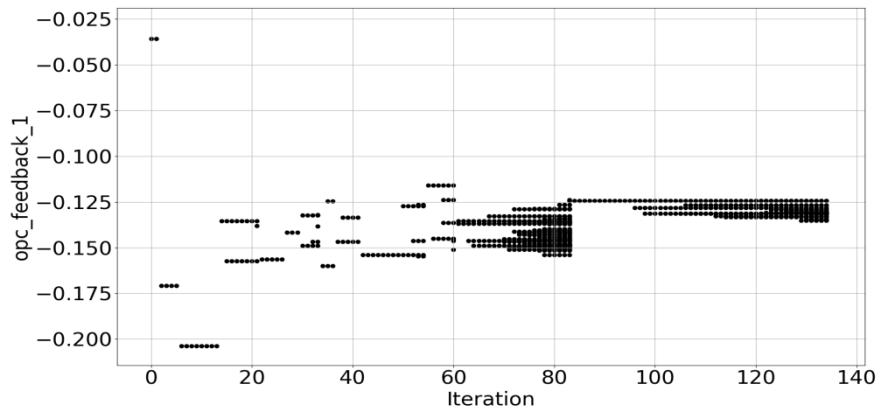
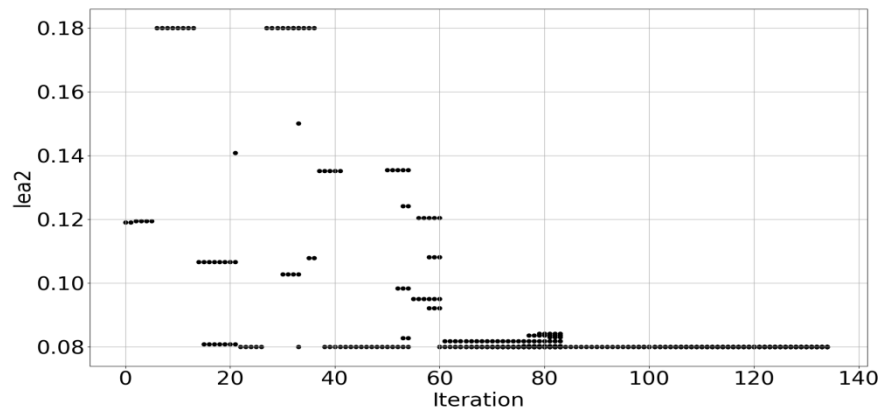
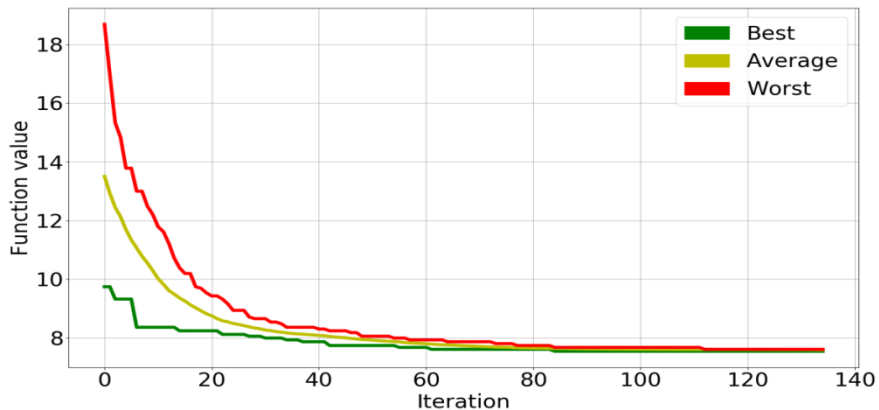
№	T	N	M	P	F, нм
1	T1	100	0,5	0,7	7,55
2	T2	100	0,5	0,7	7,55
3	T3	100	0,5	0,7	7,616
4	T4	100	0,5	0,7	11,225
5	T5	100	0,5	0,7	5,657
6	T6	100	0,5	0,7	4,899
7	T7	100	0,5	0,7	2,646

Калибровка рецепта
с методикой оценки SQUARE

№	T	N	M	P	F, мкм ²
1	T1	100	0,5	0,7	3,392
2	T2	100	0,5	0,7	3,579
3	T3	100	0,5	0,7	3,44
4	T4	100	0,5	0,7	1,433
5	T5	100	0,5	0,7	0,639
6	T6	100	0,5	0,7	0,852
7	T7	100	0,5	0,7	0,391

T – топология; N – размер популяции; M – сила мутации; P – вероятность скрещивания; F – эффективности рецепта.

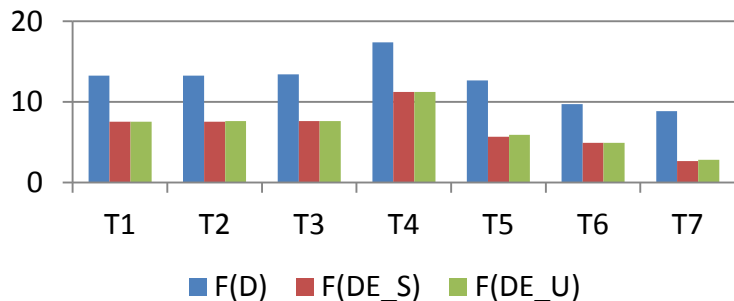
Динамика изменения значений целевой функции и оптимизируемых параметров



Оценка эффективности откалиброванного OPC-рецепта

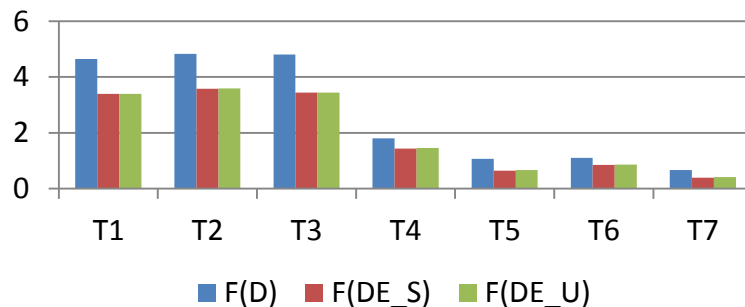
Методика EPE_RMS $F(k, EPE) \rightarrow \min$

№	T	F(D), нм	F(DE_S), нм	F(DE_U), нм
1	T1	13,229	7,550 (-43%)	7,550 (-43%)
2	T2	13,229	7,550 (-43%)	7,616 (-42%)
3	T3	13,416	7,616 (-43%)	7,616 (-43%)
4	T4	17,378	11,23 (-35%)	11,23 (-35%)
5	T5	12,649	5,657 (-55%)	5,916 (-53%)
6	T6	9,695	4,899 (-49%)	4,899 (-49%)
7	T7	8,832	2,646 (-70%)	2,828 (-68%)



Методика SQUARE $F(m, k, x, y) \rightarrow \min$

№	T	F(D), мкм²	F(DE_S), мкм²	F(DE_U), мкм²
1	T1	4,644	3,392 (-27%)	3,392 (-27%)
2	T2	4,827	3,579 (-26%)	3,590 (-26%)
3	T3	4,807	3,440 (-28%)	3,445 (-28%)
4	T4	1,807	1,433 (-21%)	1,452 (-20%)
5	T5	1,064	0,639 (-38%)	0,663 (-38%)
6	T6	1,107	0,852 (-23%)	0,866 (-22%)
7	T7	0,671	0,391 (-42%)	0,412 (-39%)



T – тестовая топология; F(D) – оценка исходного рецепта; F(DE_S) – оценка специфичного для топологии откалиброванного рецепта; F(DE_U) – оценка универсального откалиброванного рецепта.

Дальнейшие планы

1. Модернизация алгоритма для учета специфических случаев фрагментации (напр. «эффект ряби»).
2. Формирование более сложных критериев оптимизации и разработка новых методик оценки эффективности ОРС-рецепта.
3. Имплементация более продвинутых алгоритмов (нейросетевой подход, машинное обучение).
4. Участие в запусках MPW для оценки эффективности коррекции топологии с применением откалиброванного рецепта.

Спасибо за внимание!