

Шарапов А.А.

Описание имитационной модели  
образования наноразмерной неровности края  
в процессе экспонирования полимерных фоторезистов

## Ключевые пункты

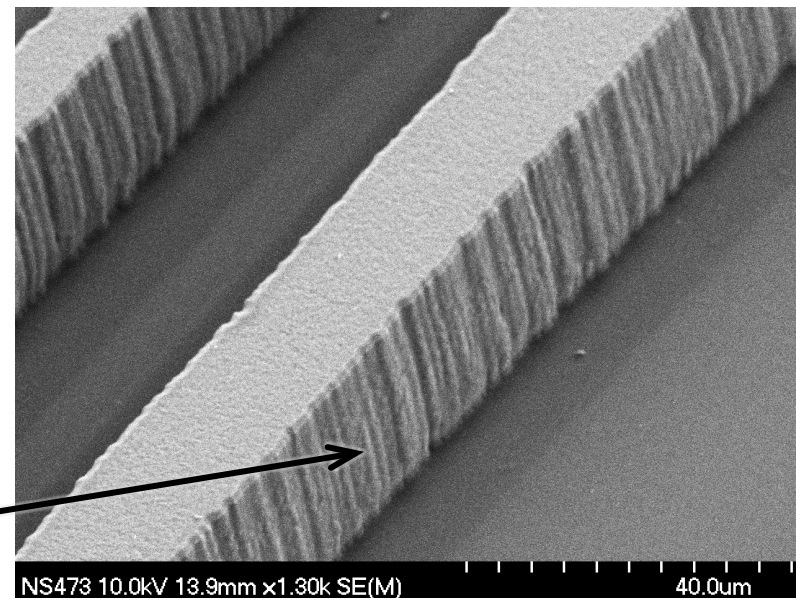
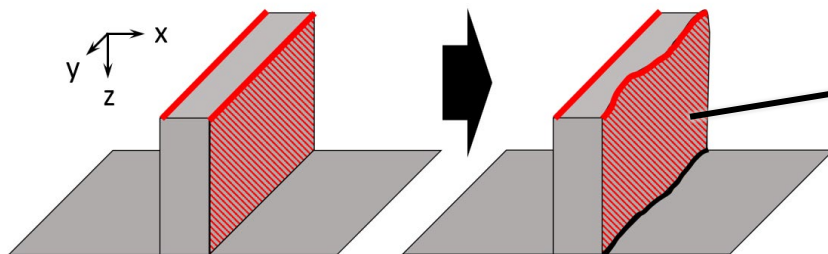
1. Актуальность изучения шероховатости боковых поверхностей
2. Способы измерения шероховатости боковых поверхностей
3. Построение модели образования неровных структур
4. Разработка программного комплекса оптимизации технологических процессов для формирования наиболее ровных структур
5. Выводы

## Ключевые пункты

1. Актуальность изучения шероховатости боковых поверхностей
2. Способы измерения шероховатости боковых поверхностей
3. Построение модели образования неровных структур
4. Разработка программного комплекса оптимизации технологических процессов для формирования наиболее ровных структур
5. Выводы

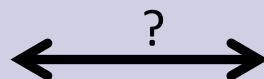
# Шероховатость

Шероховатость поверхности – совокупность параметров микрогеометрических неровностей, образующих рельеф поверхности, с шагами, малыми относительно базовой длины.



Atar, Opt. Mater., 2014

Технологические процессы

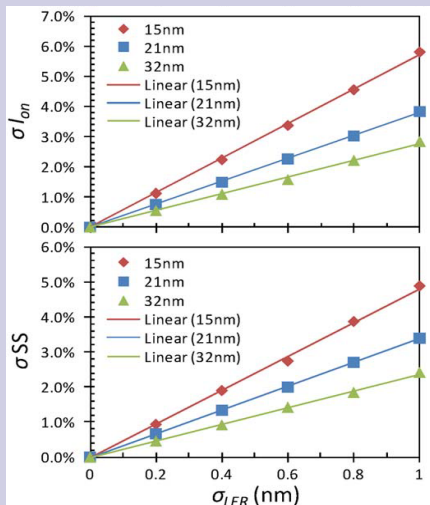


Шероховатость боковых поверхностей

# Актуальность

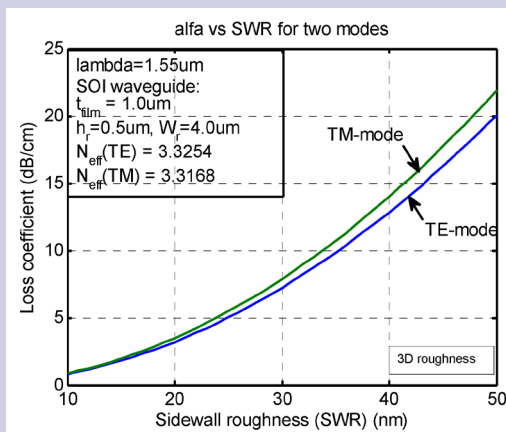
## 1 Нанoeлектроника

Рост влияния разброса линейных размеров на электрофизические параметры наноструктур



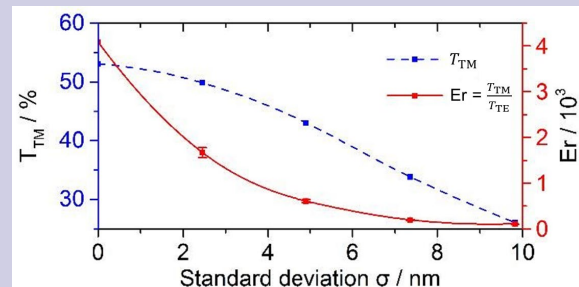
## 2 Радиофотоника

Рост оптических потерь для волноводных структур с шероховатыми стенками



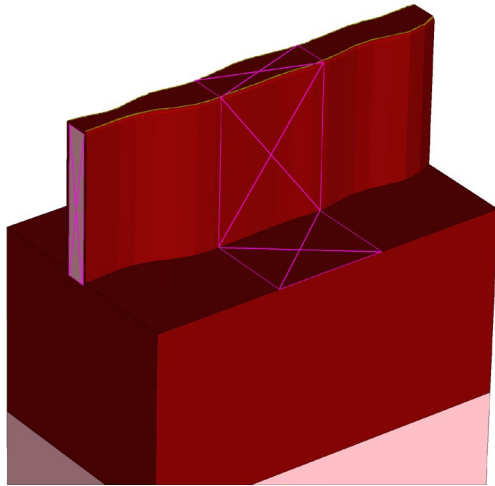
## 3 Нанооптика

Ухудшение характеристик поляризатора на основе проволочной сетки с неровными стенками

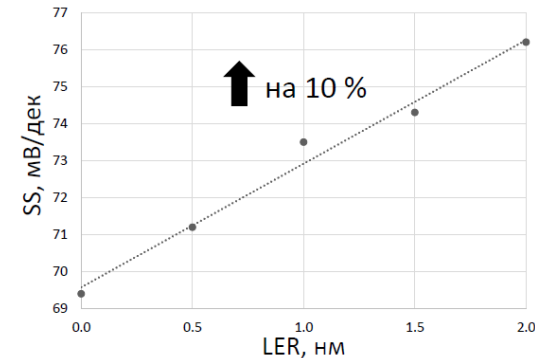
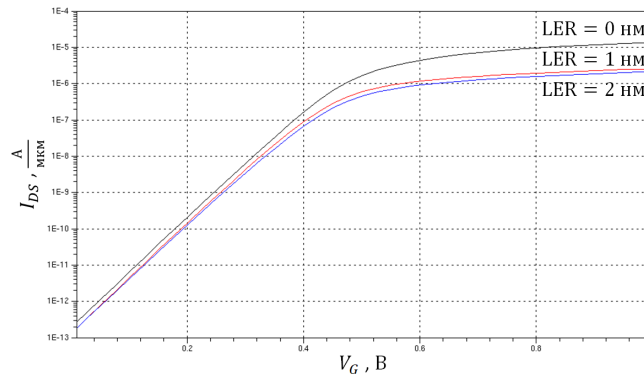
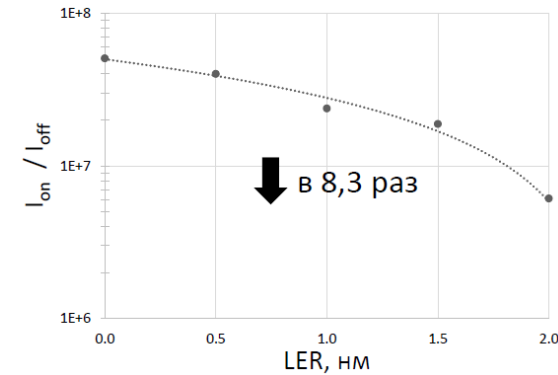
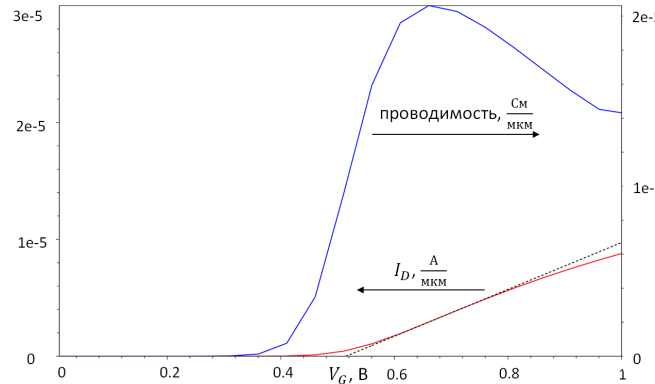


# Расчёт ВАХ FinFET с учётом шероховатости

Результат применения  
дифф.-дрейф. модели  
с квантовой поправкой  
на градиент плотности



$W \times H \times L = 8 \times 40 \times 100 \text{ нм}$   
Затвор:  $L = 30 \text{ нм}$



## Ключевые пункты

1. Актуальность изучения шероховатости боковых поверхностей
2. Способы измерения шероховатости боковых поверхностей

### Научные работы отечественных специалистов

Горнев Е.С., Новиков Ю.А. и др. Измерение параметров профилей субмикронных элементов СБИС на сканирующем силовом микроскопе. *Разработка, технология и производство полупроводниковых микросхем*, 2000.

Волк Ч.П., Горнев Е.С. и др. Универсальная линейная мера для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии. *Электронная промышленность*, 2000.

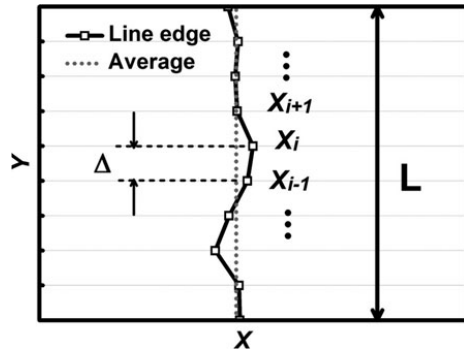
Тодуа П.А., Быков В.А. и др. Метрологическое обеспечение измерений длины в микрометровом и нанометровом диапазонах и их внедрение в микроэлектронику и нанотехнологию. *Микросистемная техника*, 2004.

Губский К.Л., Золотаревский С.Ю. и др. Нанометрология и особенности метрологического обеспечения измерений параметров шероховатости и рельефа наноструктурированных поверхностей. *Измерительная техника*, 2010.

# Способы определения неровности края

## 1 Среднеквадрат. отклонение

$$LER_k = 3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}{n}}, k = 1, 2$$

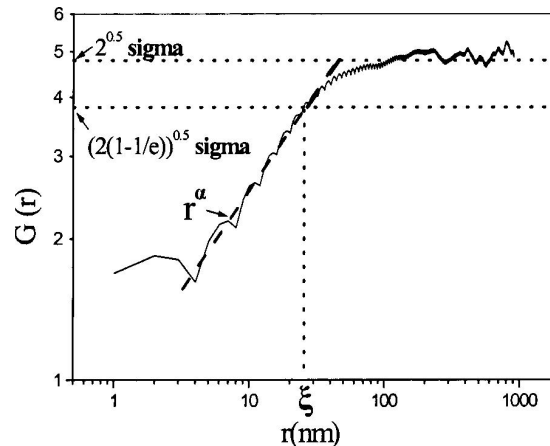


Наиболее стабильный результат  
[Шарапов, Баранов, конф. МФТИ, 2017]

## 2 Корреляционная функция

$$G(md) = \sqrt{\frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} (\delta_{i+m} - \delta_i)^2},$$

где  $\delta_i = x_i - \bar{x}$ ,  $d = y_i - y_{i-1}$

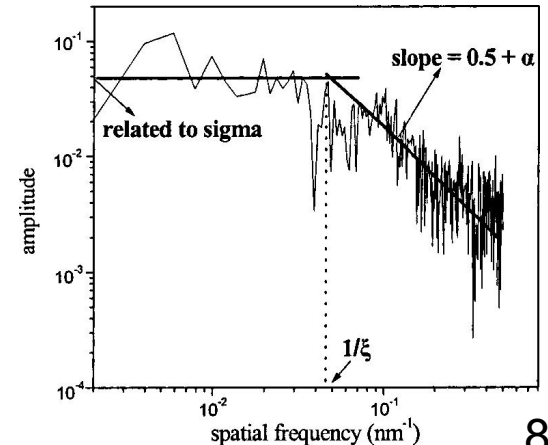


Constantoudis et al., J Vac. Sci. Technol. B, 2003

## 3 Спектральная плотн. мощности

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \int P(k) dk,$$

где  $P(k) = \frac{1}{2\pi} \int y(x) e^{-ik \cdot x} dx$



там же



# Измерение шероховатости наноразмерных структур

## $L_W^E$ R Calculator

Шарапов, Баранов, Труды МФТИ, 2018

Скорость пакетной  
обработки РЭМ-  
изображений, с<sup>-1</sup>

Валидация

Язык  
программирования

Лицензия

v1, 2017 – 2018

0.2

по результатам  
ручных измерений

Python

свободная

v2, 2020 – наст. вр.

2

по результатам  
работы ПО Hitachi

распознавание  
неудачных структур

MATLAB

проприетарное ПО

↗  
10x

↗

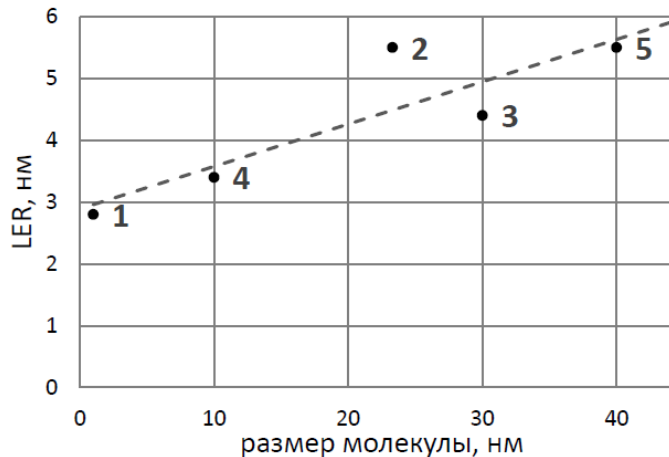
+

## Ключевые пункты

1. Актуальность изучения шероховатости боковых поверхностей
2. Способы измерения шероховатости боковых поверхностей
3. Построение модели образования неровных структур
4. Разработка программного комплекса оптимизации технологических процессов для формирования наиболее ровных структур
5. Выводы

# Связь амплитуды шероховатости и размеров молекул электронных резистов

Резист	поз. (+) негат. (-)	орг. (+) неорг. (-)	хим. усил.	главные компоненты
XR-1541	-	-	-	HSQ [2]
EP555JE	+	+	+	хлор. полистирол [3]
ZEP-520A	+	+	+	$\alpha$ -метилстирол + хлорометилакрилат [4]
OEBR 038	-	+	+	PGMA [5]
OEBR 112	+	+	+	PHS [5]
OEBR 164	+	+	+	полигидроксистир. смола [6]

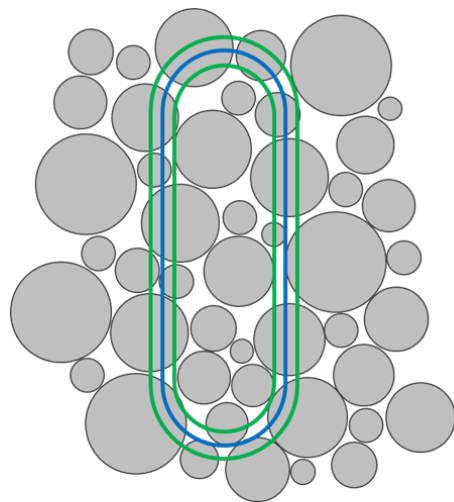


Резисты:

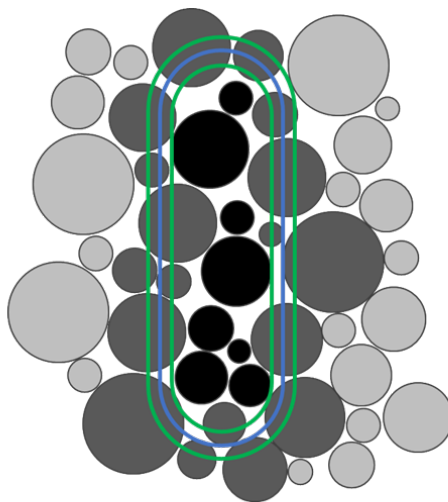
1. XR-1541
2. EP555JE
3. ZEP-520A
4. OEBR 038
5. OEBR 112

Обнаружена положительная корреляция размера  
полимерных комплексов резиста и LER полученной структуры

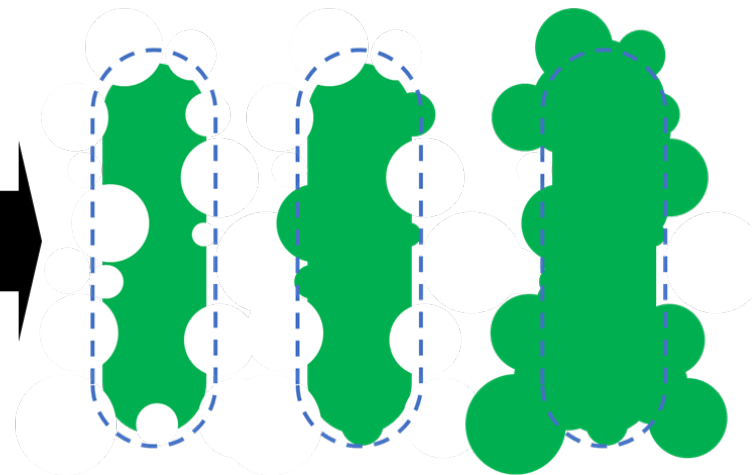
# Имитационная модель шероховатости



исходный резист  
и область засветки

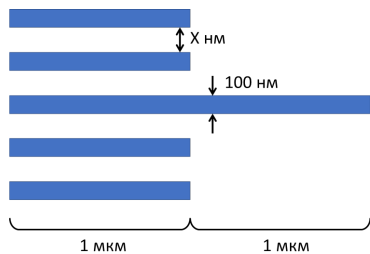


- гарантированно засвеченные молекулы
- молекулы в области негарантированной засветки

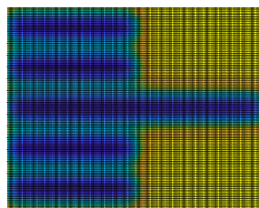


возможные результаты проявления

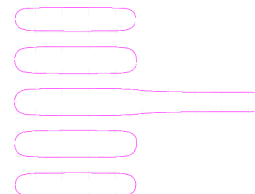
# Моделирование шероховатости в резисте



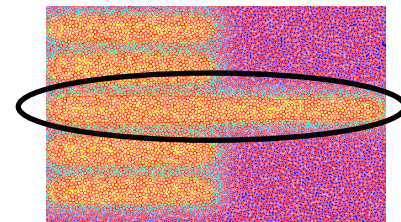
ТОПОЛОГИЯ



воздушное  
изображение



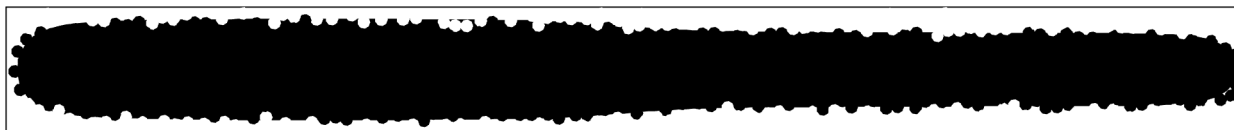
контуры  
проявления резиста



имитационная  
модель  
проявления

мат. модель  
Хопкинса

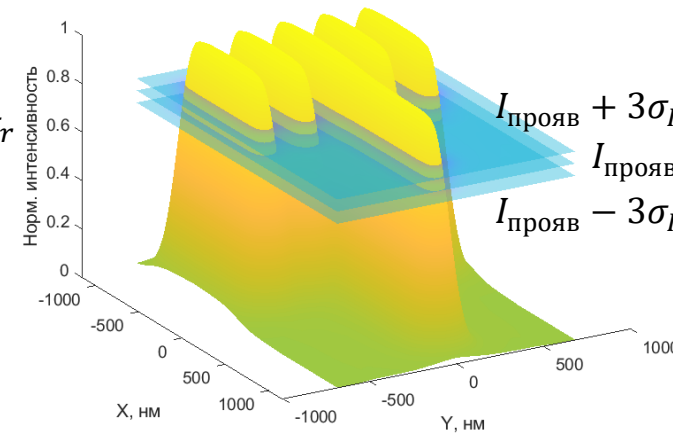
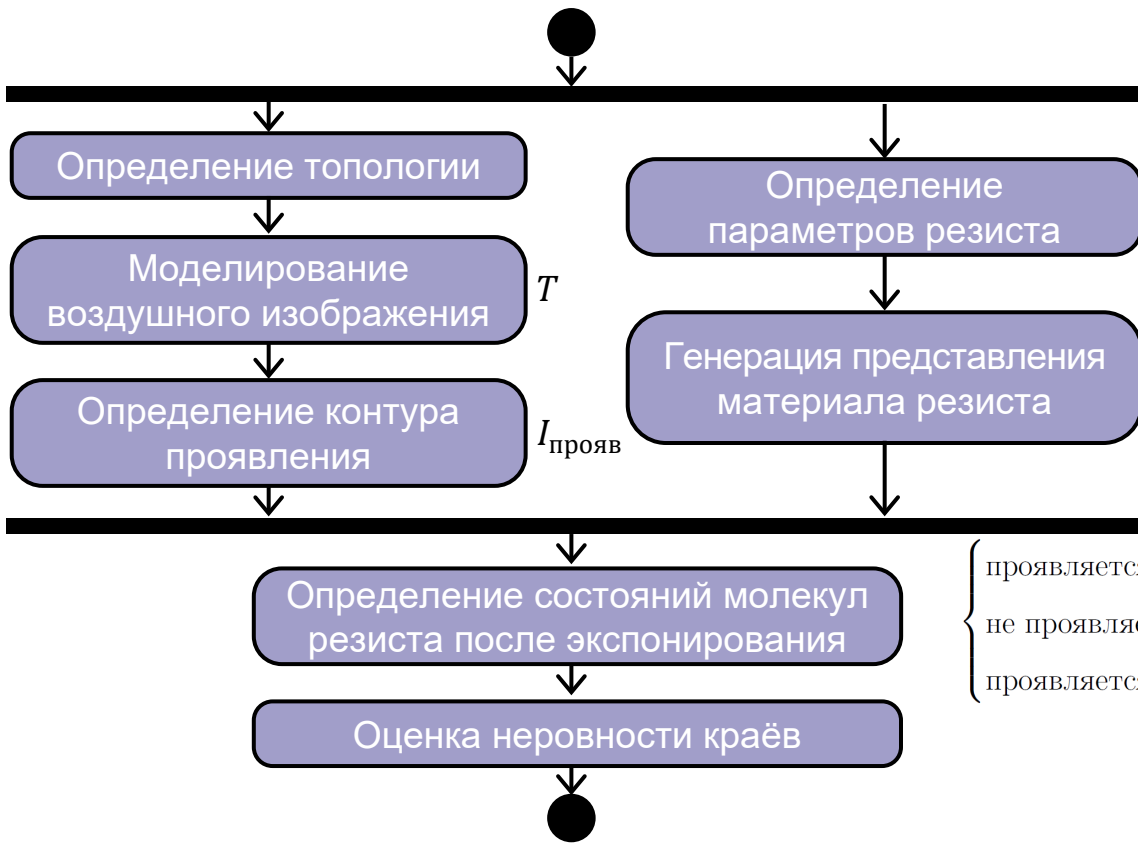
эмпирическая  
модель для «90 нм»



LER  
↓  
период

LER  
↓  
один

# Имитационная модель шероховатости



$\left\{ \begin{array}{l} \text{проявляется,} \\ \text{не проявляется,} \\ \text{проявляется с вероятностью } \frac{I_{\max} - I}{I_{\max} - I_{\min}}, \end{array} \right.$

если  $I \geq I_{\text{прояв}} + 3\sigma_I$   
 если  $I \leq I_{\text{прояв}} - 3\sigma_I$   
 если  $|I - I_{\text{прояв}}| < 3\sigma_I$ ,

$$\sigma_I(I) = \sqrt{\frac{I}{T A \frac{\lambda}{hc}}}$$

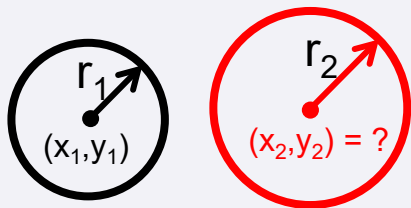
$r$  – средний радиус молекул

$\sigma_r$  – дисперсия радиусов молекул

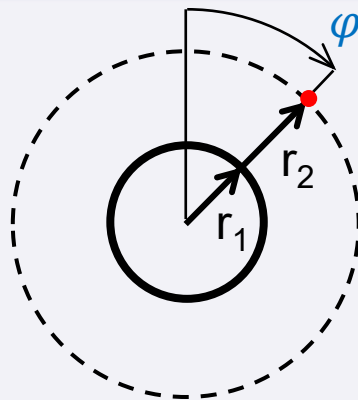
$T$  – время экспонирования

# Схема генерации представления материала резиста

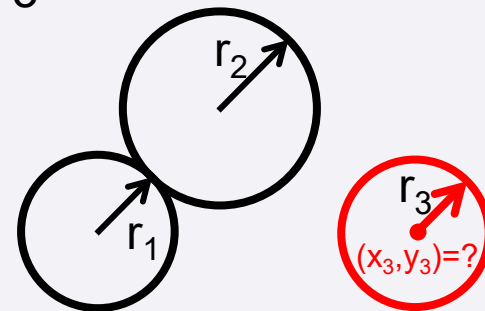
1



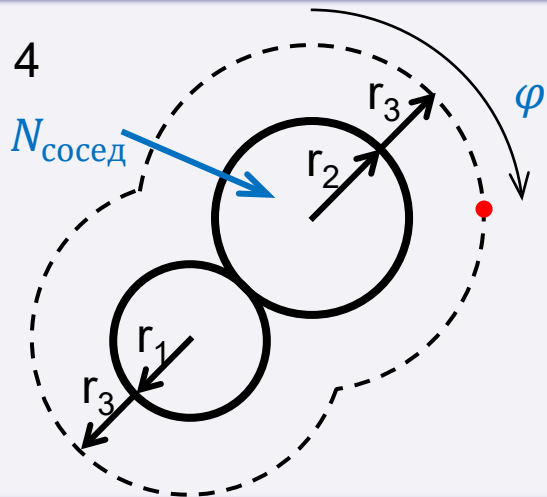
2



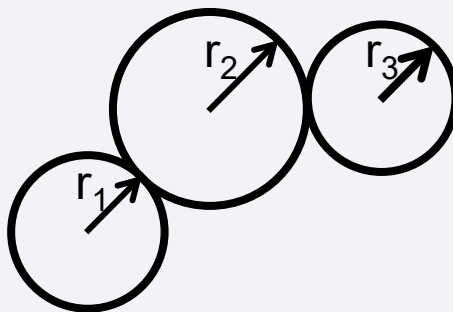
3



4



5

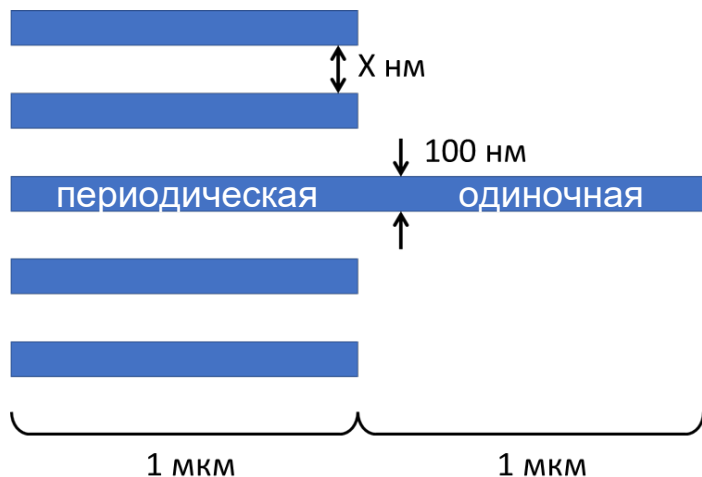


6

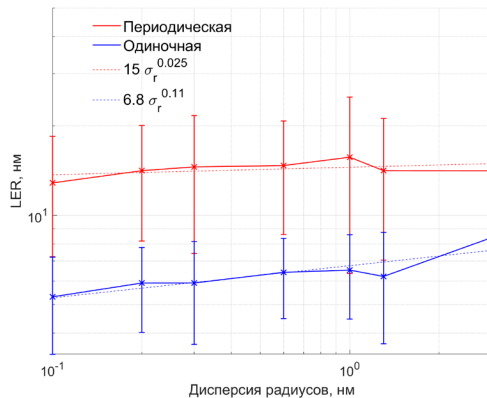
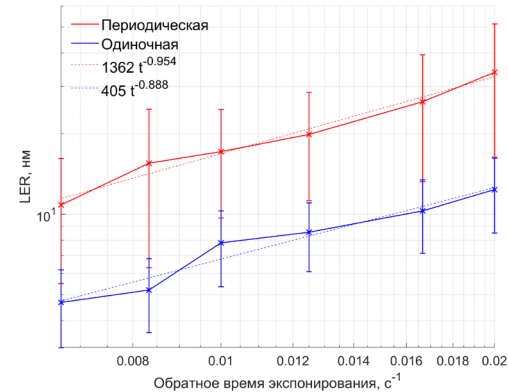
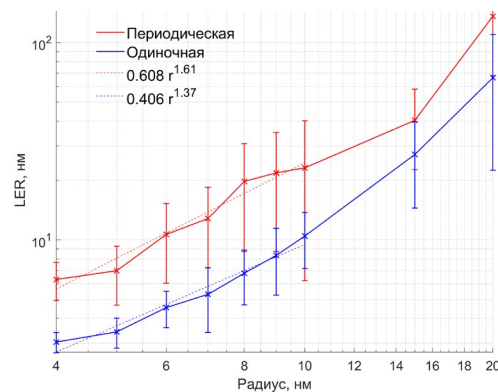
и так далее для 4, 5, ... N

$\varphi$   
 $N_{\text{сосед}}$  } выбираются случайно  
↓  
 $(x_{i+1}, y_{i+1})$

# Связь амплитуды неровности с параметрами



$X = 100, \mathbf{140}, 180, 200, 230, 280$



$$\text{LER} \propto \frac{r^\alpha \sigma_r^\beta}{T^\gamma}$$

	период.	один.
$\alpha$	1.61	1.37
$\beta$	0.025	0.11
$\gamma$	0.954	0.888

$r$  – средний радиус молекул

$\sigma_r$  – дисперсия радиусов молекул

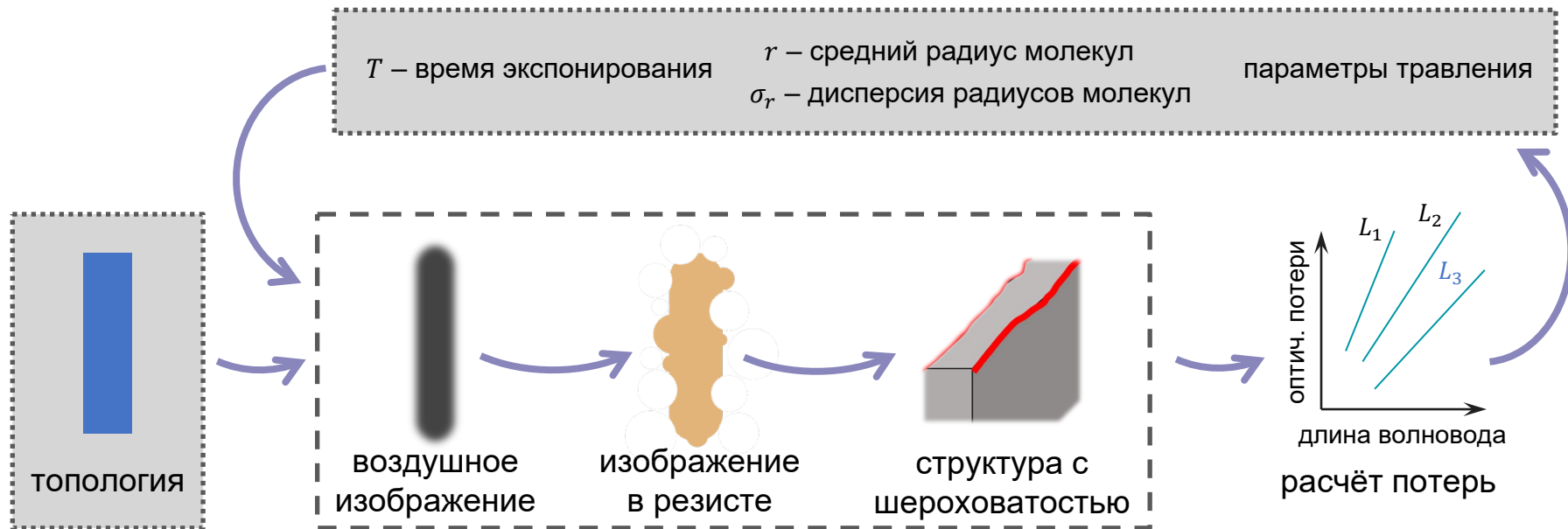
$T$  – время экспонирования



## Ключевые пункты

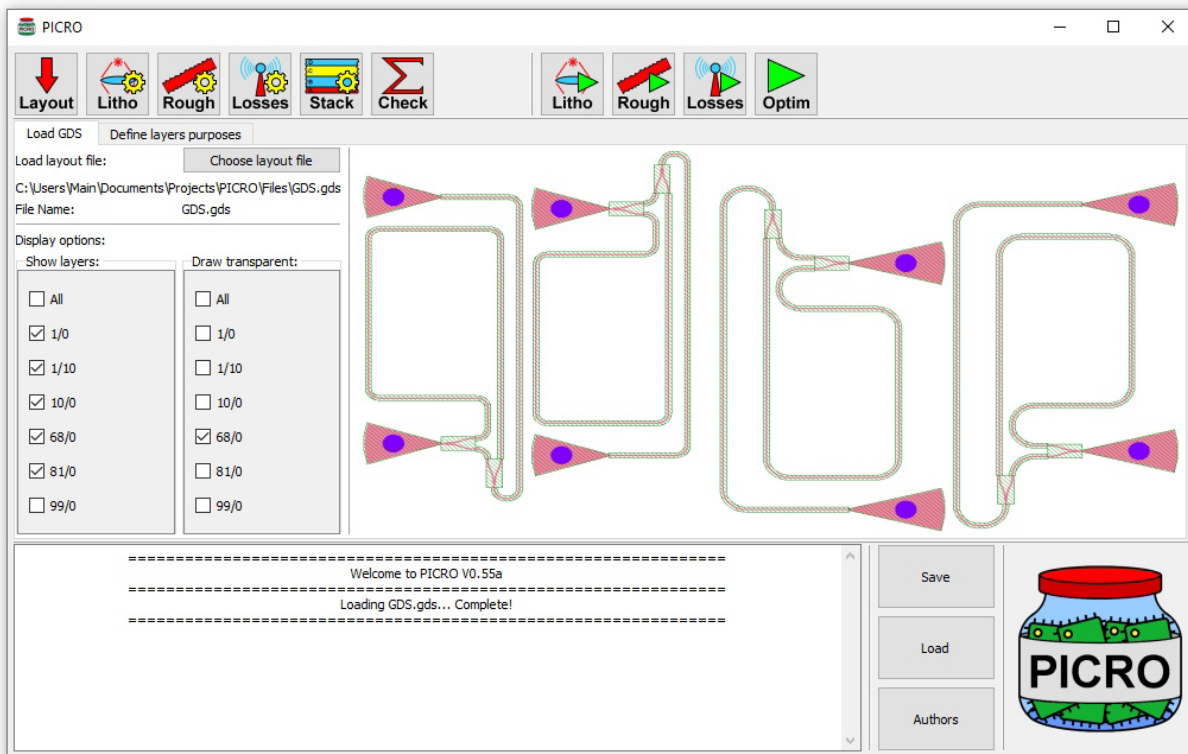
1. Актуальность изучения шероховатости боковых поверхностей
2. Способы измерения шероховатости боковых поверхностей
3. Построение модели образования неровных структур
4. Разработка программного комплекса оптимизации технологических процессов для формирования наиболее ровных структур
5. Выводы

# Предлагаемый метод оптимизации параметров фотолитографии



A.A. Sharapov, E.S. Shamin, I.D. Skuratov, E.S. Gornev. Grounds and setting of the software complex for photolithography optimization for minimization of losses in optical structures of photonic integrated circuits. Journal of Physics: Conference Series, 2020

# Программный комплекс PICRO



**INRADEL**  
Финалист конкурса в 2020 г.

## Ключевые пункты

1. Актуальность изучения шероховатости боковых поверхностей
2. Способы измерения шероховатости боковых поверхностей
3. Построение модели образования неровных структур
4. Разработка программного комплекса оптимизации технологических процессов для формирования наиболее ровных структур
5. Выводы

## Выводы

1. Шероховатость боковых поверхностей оказывает **влияние** на характеристики нанoeлектронных (суб-90-нм) и радиофотонных устройств.
2. Шероховатость доступна для **измерения** методами АСМ и РЭМ, наиболее стабильный метод оценки неровности края – по среднеквадратичному отклонению.
3. Разработана базовая **модель** формирования шероховатости, учитывающая молекулярный состав резиста на этапе экспонирования
4. Представляется возможным **снизить** амплитуду шероховатости, управляя параметрами технологических процессов при формировании наноструктур.

## Благодарности

**Баранов Глеб Владимирович**

к.ф.-м.н., нач. лаборатории ОРСВЧУ АО «НИИМЭ»

**Бегишев Александр Рустемович**

вед. инженер-технолог ГТП Измерение ПАО «Микрон»

**Иванов Владимир Викторович**

зам. начальника ОПФШ АО «НИИМЭ»

**Итальянцев Александр Георгиевич**

д.ф.-м.н., проф., нач. ОФЭ АО «НИИМЭ»

**Светиков Владимир Васильевич**

к.ф.-м.н., н.с. ИОФ РАН

**Балан Никита Николаевич**

к.т.н., инж. 1 кат. ОПФШ АО «НИИМЭ»

**Ключников Алексей Сергеевич**

к.т.н., нач. ОПТМ АО «НИИМЭ»

**Шишлянников Антон Валерьевич**

аспирант МФТИ, н.с. АО «НИИМЭ»

**Киселёв Алексей Сергеевич**

рук. отдела логистики ПАО «Микрон»

**Красюков Антон Юрьевич**

к.т.н., доц. каф. ИЭМС НИУ МИЭТ

**Титова Елена Игоревна**

аспирант МФТИ

Шарапов А.А.

Описание имитационной модели  
образования наноразмерной неровности края  
в процессе экспонирования полимерных фоторезистов