

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

В.П. Вейко

**ЛАЗЕРНЫЕ МИКРО– И
НАНОТЕХНОЛОГИИ
В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ**

Опорный конспект лекций



**Санкт-Петербург
2011**

В.П. Вейко В.П. Опорный конспект лекций «Лазерные микро– и нанотехнологии в микроэлектронике». – СПб: НИУ ИТМО, 2011. – 141 с.

Для бакалавров и магистров направлений 200500 «Лазерная техника и лазерные технологии, 200200 «Оптотехника», 223200 «Техническая физика», 200700 «Фотоника и оптоинформатика», 200100 «Приборостроение», а также для студентов специальностей 200201 «Лазерная техника и лазерные технологии», 210401 «Физика и техника оптической связи». Курс также может быть полезен инженерам, ученым, менеджерам, которые интересуются применением лазерных технологий в микроэлектронике, для понимания преимуществ и ограничений использования лазеров в этой области, для расширения и углубления их знаний в области процессов лазерной обработки.

Рекомендовано к печати Ученым Советом инженерно–физического факультета 13.09.11, протокол №9.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2011

©В.П. Вейко, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие

- I Основные области применения лазерных технологий в базовых процессах микроэлектроники:
 - лазерная литография
 - лазерная настройка
 - лазерный отжиг
 - импульсное лазерное нанесение пленок
 - лазерная очистка поверхности
- II Лазерная обработка тонких пленок (ЛОТП)
 - 1 Общая концепция ЛОТП
 - 2 Средства и методы ЛОТП
 - 2.1 Лазеры для ЛОТП
 - 2.2 Оптические схемы для ЛОТП:
 - фокусирующие методы
 - проекционные методы
 - роль когерентности света
 - ближнепольная оптическая литография
 - 2.3 Физические процессы формирования топологии тонких пленок (ТП)
 - лазерный нагрев тонких пленок
 - механизм удаления пленки
 - механизм локального осаждения пленок
 - лазерное окисление (с селективным травлением)
 - 3 Точность и качество ЛОТП
 - 3.1 Термические искажения изображений на ТП
 - 3.2 Термохимические искажения изображений
 - 3.3 Термомеханические процессы в пленках и подложках
 - 3.4 Гидродинамические искажения
 - 3.5 Газодинамические искажения
 - 3.6 Оптические искажения
 - 4 Основные применения ЛОТП

- 4.1 Технология фотошаблонов:**
 - лазерная ретушь фотошаблонов
 - оперативная корректировка топологии
 - изготовление фотошаблонов
 - формирование топологии интегральных схем
 - лазерная генерация фотошаблонов окислением тонких металлических пленок с селективным травлением
- 4.2 Лазерный синтез дифракционных оптических элементов, CD–дисков**
- 4.3 Изготовление оптических шкал, сеток и кодовых масок**
- 4.4 Применение лазерного локального переноса пленок**
- 4.5 Возможности улучшения процесса лазерной подгонки**

5 Перспективы ЛОТП

- 5.1 Оптимизация процессов лазерной обработки:**
- 5.2 Возможности улучшения лазерной подгонки**
- 5.3 Развитие методов локального лазерного переноса пленок (LIFT)**
- 5.4 Объединение активации химических процессов с их локализацией**
- 5.5 Преодоление дифракционного предела в ЛОТП**

Выводы

ПРЕДИСЛОВИЕ

Ожидаемая нано*технологическая революция XXI века - окажет глубокое влияние на промышленный сектор и на все сферы деятельности человека: от промышленного производства – выплавки металлов, создания микроприборов в микроэлектронике, нанофотонике, до разработки новых биосовместимых устройств и препаратов, методов и подходов в медицине, фармацевтике и т.д. Нанотехнология предполагает управление свойствами материалов, изделий и другой продукции) на атомарном или молекулярном уровнях.

В настоящем пособии будут рассмотрены вопросы применения лазерных микро– и нанотехнологий в микроэлектронике. Еще недавно длина волны света считалась пределом его локализации, и в связи с тем, что середина видимой области приходится на 0,5 мкм, оптические методы признавались бесперспективными для субмикронного (нанометрового) диапазона размеров. На смену им разрабатывались процессы и методы электронной и рентгеновской литографии.

Ситуация радикальным образом изменилась в последние годы в связи с достижениям в лазерных технологиях (пороговые процессы), в изучении процессов взаимодействия излучения с веществом (нелинейные процессы) и в появлении новой области– ближнепольной оптики. Теперь оптические методы и процессы в связи с их разработанностью, гибкостью, относительной простотой, и в связи с появлением перспективы вновь являются основными методами локализации воздействий на данном этапе развития нанотехнологий.

* Нано–от греч. карлик, пигмей–размерами менее 1 мкм

1. Основные области применения лазерных микро – и нанотехнологий в базовых процессах микроэлектроники

- Лазерная литография**
- Лазерная подстройка параметров**
- Лазерный отжиг пленочных структур**
- Импульсное лазерное нанесение пленок**
- Лазерная очистка поверхности**

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПЕРСОНАЛЬНЫХ КОМПЬЮТЕРОВ/НОУТБУКОВ



*NEC — данные Nippon Electronic Corporation

- LCD — жидкокристаллические дисплеи
- TFT — тонкопленочные дисплеи
- CPU — центральный процессор
- DRAM — устройство оперативной памяти
- Quartz Osc. — кварцевые резонаторы (генераторы)
- Chip R — чипы резисторов
- Package module interposer — корпуса модулей
- Second battery — вспомогательные аккумуляторы

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МОБИЛЬНЫХ ТЕЛЕФОНОВ



*NEC — данные Nippon Electronic Corporation

AMP — блок усилителей

VCO — генератор, управляемый напряжением

TCXO — термостабилизированный генератор,

Chip R — чипы резисторов, Chip L — чипы индуктивностей

PCB — силовой блок управления, Vibrator — резонатор

Buzzer — зуммер

Secondary battery — вспомогательные аккумуляторы

«В конструкции современных аудиоплееров (iPod) и мобильных устройств типа iPhone очень трудно найти хотя бы одну деталь, которая изготавливается без участия лазерных технологий»

(G.Overton, S.G.Anderson, T.Hausken, D.A.Belforte. *Optoelectronics report*, v.16, N1, 2009).

ТИПИЧНЫЕ ОПЕРАЦИИ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Область применения	Операция	Компонент или устройство	Коммент. (основная, сборочно-монтажная)
Полупроводниковые устройства	Ретушь фотошаблонов LSis	Фотошаблоны (перекрестия)	Основная
	Маркировка пластин Si	пластины Si	Сборочно-монтажная
	Литография эксимерным лазером	LSis	Основная
	Восстановление памяти	Динамическая выборочная оптическая память (DRAM)	Основная
	Точная точечная сварка	Оптические модули	Сборочно-монтажная
	Маркировка корпусов ИС	Корпуса интегральных схем (ИС)	Сборочно-монтажная
	Сквозное микро сверление	Корпуса CSP ИС	Сборочно-монтажная Основная

Область применения	Операция	Компонент или устройство	Коммент. (основная упаковка)
Устройства дисплея	Ретушь фотошаблонов LCD	Фотошаблоны для LCD	Основная
	Восстановление TFT-LCD	TFT-LCD	Основная
	ELA отжиг низко температурных ELA	Поли-Si TFT-LCD	Основная
	Точечная сварка электронных пушек	TV трубки	Сборочно-монтажная Основная
Компоненты схемы	Подстройка резисторов	Чипы резисторов	Основная
	Настройка частоты резонаторов	VCO, TCXO	Основная
	Сквозное сверление встроенных пультов	Электронные печатные платы	Сборочно-монтажная Основная
	Точная точечная сварка	Волоконная оптика	Сборочно-монтажная
	Точная точечная сварка	Миниатюрные реле	Сборочно-монтажная
	Маркировка корпусов	Корпуса компонентов	Сборочно-монтажная

Область применения	Операция	Компонент или устройство	Коммент. (основная сборочно-монтажная)
Периферические устройства	Текстурирование жёстких дисков	Жёсткие диски	Основная
	Точечная сварка подвески суппорта жёсткого диска	Суппорты жёсткого диска	Сборочно-монтажная
	Сверление насадок ввода чернил в принтерах	Головки принтера для ввода чернил	Основная
	Маркировка	Клавиатуры, наборы клавиш	Сборочно-монтажная
Энергетические устройства (устройства питания)	Шовная сварка пломб и отсеков батарей	Литиевые ионные батареи	Сборочно-монтажная
	Формирование топологии модулей а-кремниевых солнечных элементов	солнечные элементы с аморфным Si	Основная

ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Основной физический процесс	Основные лазерные источники	Технологии
Точная термическая абляция (испарение)	Эксимерные Nd-YAG CO ₂	Формирование топологии, ретушь фотошаблонов, подстройка R,C,f . Сквозное микросверление отверстий для электронных печатных плат, насадок для чернил принтеров. Резка пластин полупроводников, солнечных панелей, стекла, керамики.
Фотоабляция	Эксимерные	Субмикронная литография на полимерах
Влажное термо- и фотохимическое травление	Эксимерные Ar-ионные, CO ₂	Изготовление фотошаблонов, MEMS, MOEMS
3D микро структурирование	Эксимерные , Nd-YAG	Прототипирование, лазер-LIGA, MEMS, MOEMS
Управление микрогеометрией поверхности	Эксимерные Nd-YAG CO ₂	Планаризация, полировка стекла, тестирование жёстких магнитных дисков

Основной физический процесс	Основные лазерные источники	Технологии
<p>Осаждение тонких плёнок, в том числе импульсное (PLD), химическое осаждение из паровой фазы (LCVD), лазерно-химическая лучевая эпитаксия (LCBE) лазерно-индуцированной перенос плёнок (LIFT)</p>	<p>Nd-YAG Эксимерные</p>	<p>Высокотемпературные сверхпроводящие сенсорные устройства и пр. Рентгеновские интерференционные зеркала, создание структур на сверхрешётках . Ретушь фотошаблонов. Создание локальных областей полупроводников, металлов, диэлектриков</p>
<p>Отжиг, нагрев</p>	<p>Эксимерные Nd-YAG</p>	<p>Ионно- имплантируемые структуры, α-Si плоские панели дисплеев, омические контакты, синтез силицидов Pt_2Si, Pd_2Si и пр., диффузия полупроводниковых соединений $AlSb$, $CdTe$, $CdSe$</p>
<p>Диффузия</p>	<p>Nd-YAG</p>	<p>Селективное легирование полупроводников (GILD)</p>
<p>Нагрев, плавление</p>	<p>Nd-YAG, CO_2</p>	<p>Микросварка/пайка полупроводников, металлов, стекла, керамики</p>
<p>Очистка поверхности</p>	<p>Эксимерные, Nd-YAG</p>	<p>Изъятие осколков суб-микронных размеров</p>

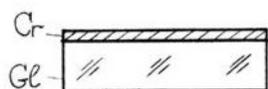
ЛАЗЕРНАЯ ЛИТОГРАФИЯ, принципы

ТРАДИЦИОННАЯ
ЛАЗЕРНАЯ
ФОТОЛИТОГРАФИЯ

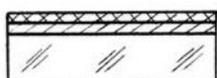
1. УДАЛЕНИЕ
ПЛЕНКИ
(ИСПАРЕНИЕ
+ АБЛЯЦИЯ)

2. ЛОКАЛЬНОЕ
ОСАЖДЕНИЕ
ПЛЕНКИ
(ЛАЗЕРНЫЙ
ПЕРЕНОС)

3. ЛОКАЛЬНОЕ
ОКИСЛЕНИЕ
ПЛЕНКИ
+ СЕЛЕКТИВНОЕ
ТРАВЛЕНИЕ



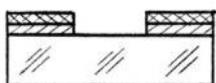
1. исходная
структура



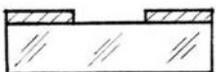
2. нанесение слоя
фоторезиста



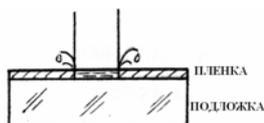
3. экспонирование



4. травление Cr



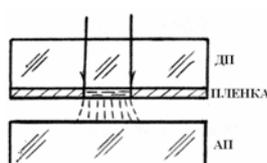
5. удаление
фоторезиста



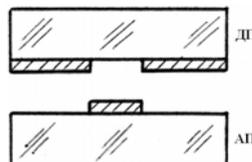
1. испарение
(удаление)



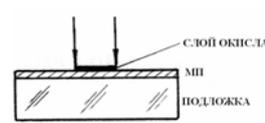
2. результат —
отверстие в
пленке



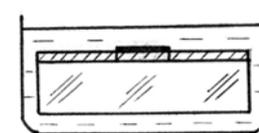
1. экспонирование
(испарение)



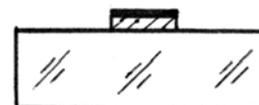
2. результат —
конденсация
пленки



1. экспонирование
(окисление)



2. селективное
травление в
HCl+Al
катализатор



3. результат —
элемент пленки

Здесь показаны только основные операции, за исключением промывки, сушки и т.п.

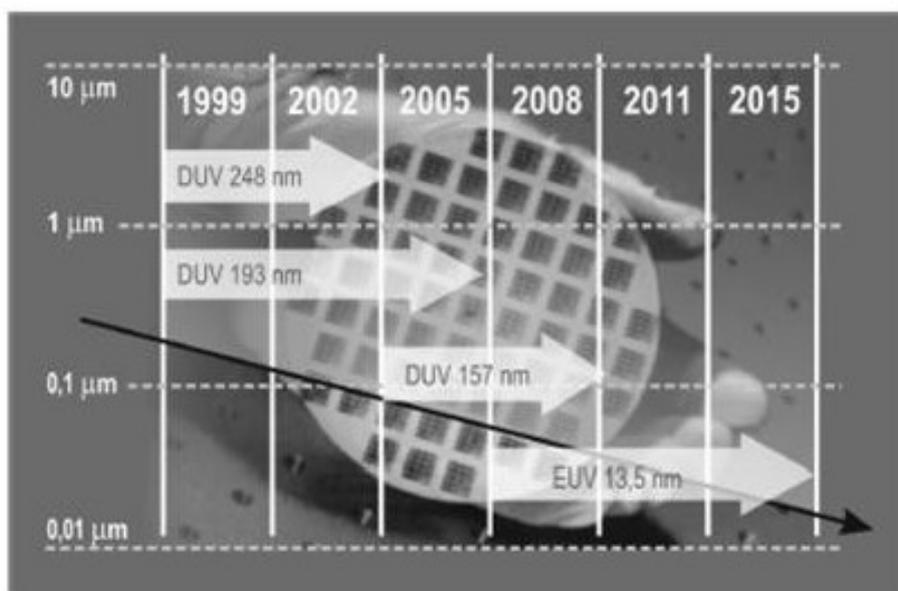
ДП — донорная подложка, АП — акцепторная подложка, МП — металлическая (или полупроводниковая) пленка (поверхность)

ЛАЗЕРНАЯ ФОТОЛИТОГРАФИЯ в производстве оперативной памяти

Широко используемая в микроэлектронике лазерная литография обеспечивает производство например, микрочипов памяти чрезвычайно большого объема.

Так, даже 256 Мб оперативная память (DRAM) которая содержит 540 млн транзисторов и конденсаторов, эквивалентна объему информации, содержащейся на 2100 стандартных газетных страницах. Для изготовления структурных элементов современных систем памяти и других устройств персональных компьютеров используется излучение KrF эксимерных лазеров с длиной волны 248 нм.

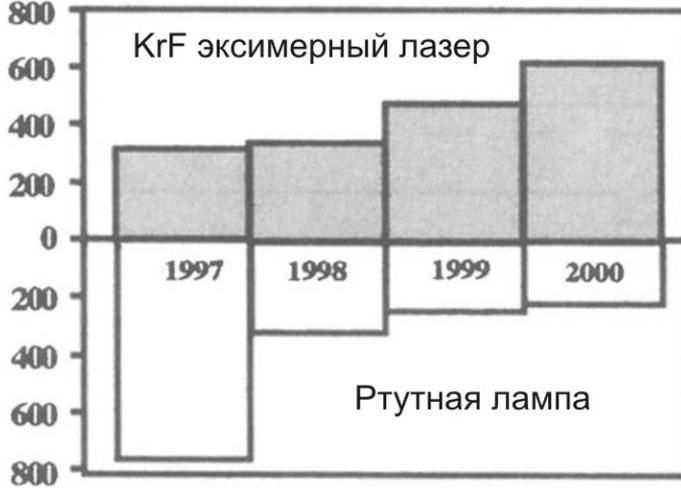
Начиная с 2009 г. 64 Гб DRAM производится с использованием более коротких длин волн — 193 нм (ArF лазер) и 157 нм (F₂ лазер).



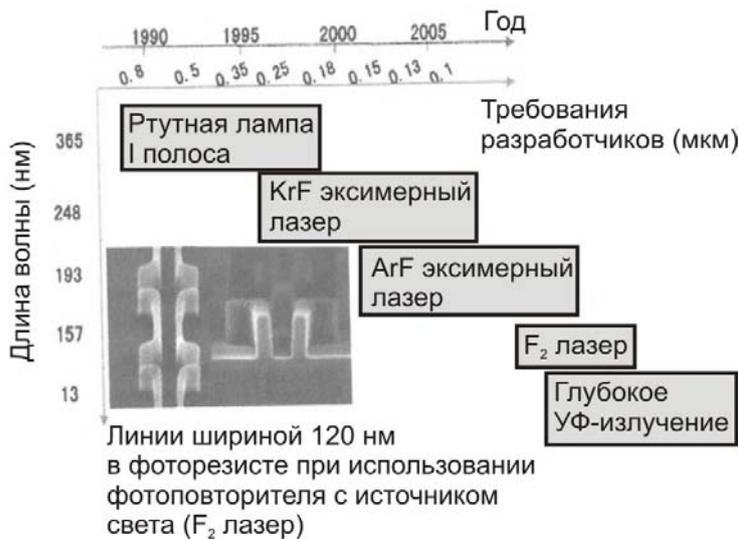
Тенденции уменьшения размеров полупроводниковых структур и области применения различных лазерных источников (эксимерных лазеров с длинами волн 248, 193 и 157 нм, а также источников глубокого и вакуумного УФ света).

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЛАЗЕРНОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ

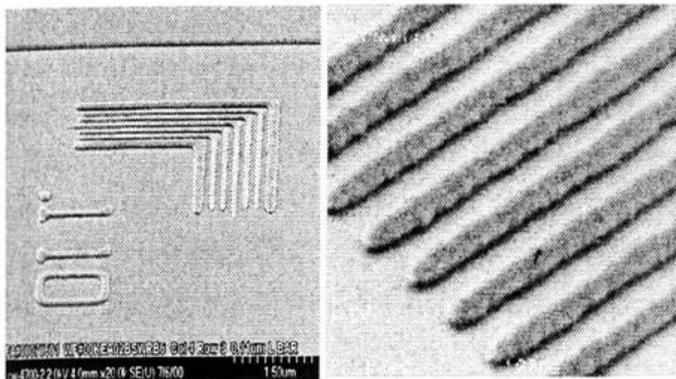
Количество,
шт



Рост продаж эксимерных лазерных систем для фото литографии



Основная тенденция фото литографии – к лазерному экспонированию

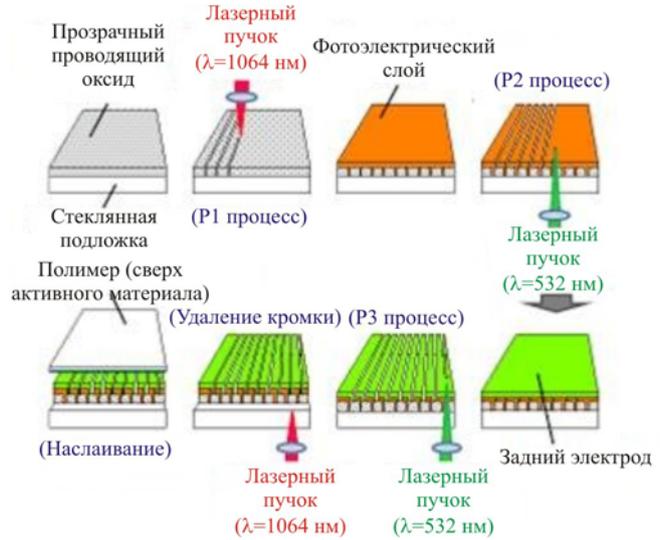


Примеры структур в фоторезисте шириной 110 нм (а) и 90 нм (б), полученные с помощью F₂ лазера ($\lambda = 157$ нм) на фотоповторителе Sematech.

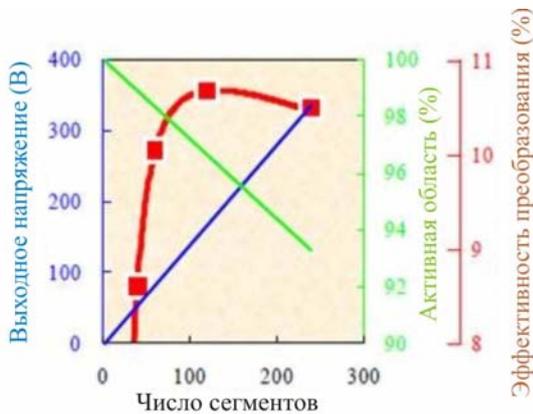
ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В УСТРОЙСТВАХ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ



Мировой рост продаж солнечных панелей с 2001 по 2010 г.г.



Основные этапы изготовления тонкопленочных кремниевых солнечных панелей (ТКСП)



Выходное напряжение, размер активной зоны и коэффициент преобразования (ТКСП) как функция количества сегментов, интегрированных в одну панель



Презентация ТКСП 5.5 поколения солнечная панель размером 1,100 mm x 1,400 mm), a-Si:H/ μ c-Si:H.

ПРЯМОЕ ЛАЗЕРНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Лазерное формирование топологии (ФТ) тонкопленочной солнечной ячейки

NEC *

Структура α -Si солнечной ячейки

Ширина реза: 30-100 мкм

ФТ α -Si 2-й гармоникой Nd:YAG лазера (0.532 мкм)
ФТ ППО Nd:YAG лазером (1.06 мкм)

Высокоскоростное ФТ ППО (TiO)

1000 мм/с

ФТ Al заднего электрода

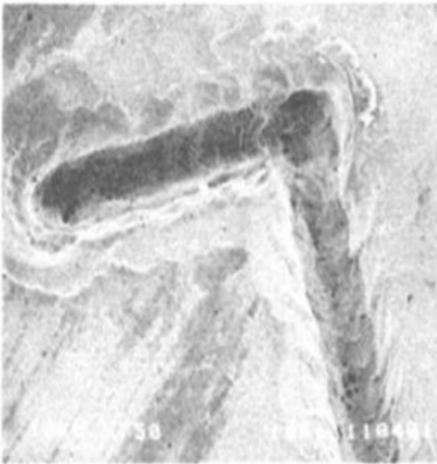
ФТ сформированным пучком

*NEC — данные Nippon Electronic Corporation

**ЛАЗЕРНАЯ ПОДСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ
ПЛЕНОЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ
(сопротивлений резисторов,
емкостей конденсаторов, индуктивностей, частот
кварцевых резонаторов и т.п.)**

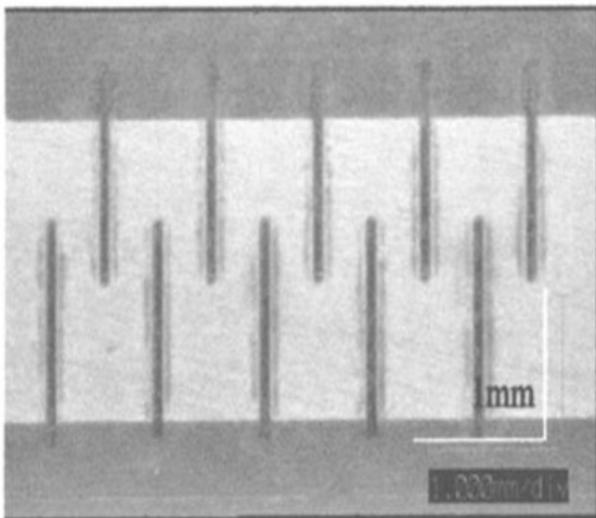
Пример лазерной подстройки

NEC*



**Подгонка сверхмалого
чипа резисторов типа 0603**

**Ширина реза ~ 20 мкм
Производительность
~ 170 резисторов/сек**



**Резка пленки Si на
подложке из стекло-
эпоксидной смолы
(зеленый цвет: резистивный слой)**

Толщина: 40 мкм

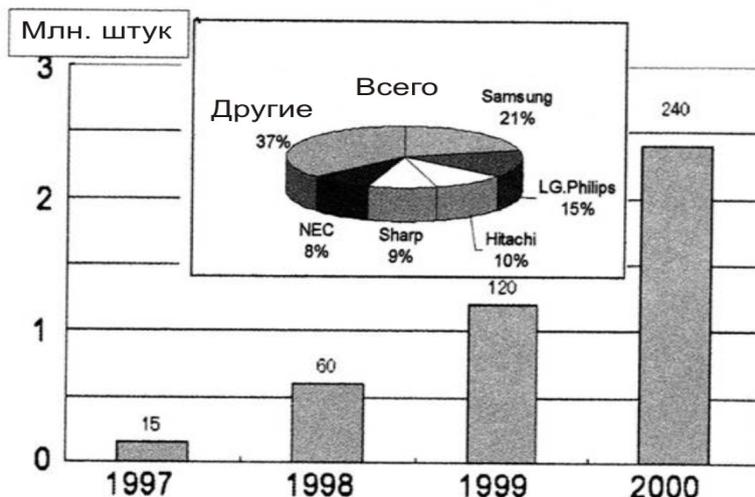
Лазер: 532 нм, Q-switched YAG-SHG

Скорость резки: 5 мм/с (@ 1 кГц)

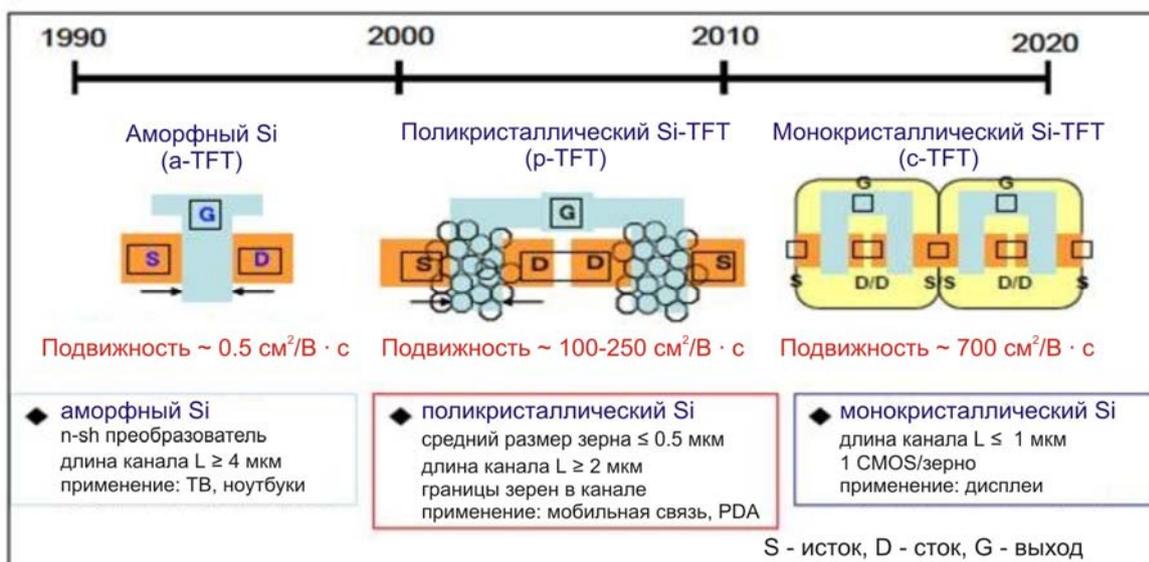
**Применение: подстройка
индуктивностей для
высокочастотных цепей**

*NEC — данные Nippon Electronic Corporation

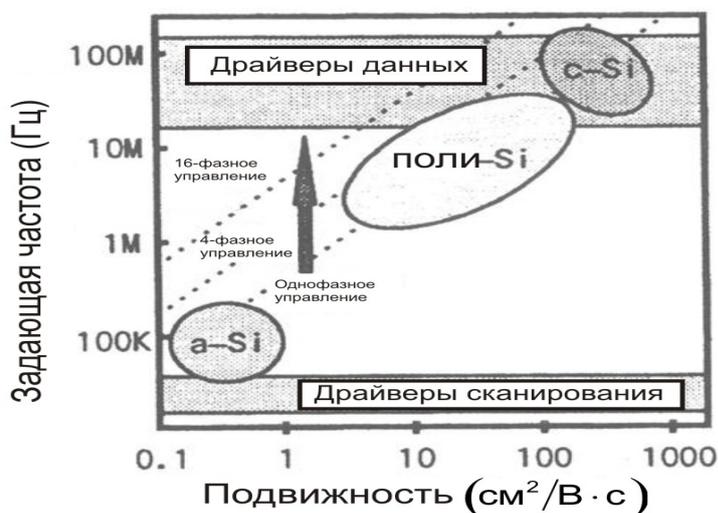
ЛАЗЕРНЫЙ ОТЖИГ LCD-TFT ДИСПЛЕЕВ



Уровень продаж тонкопленочных TFT- дисплеев персональных компьютеров на мировом рынке

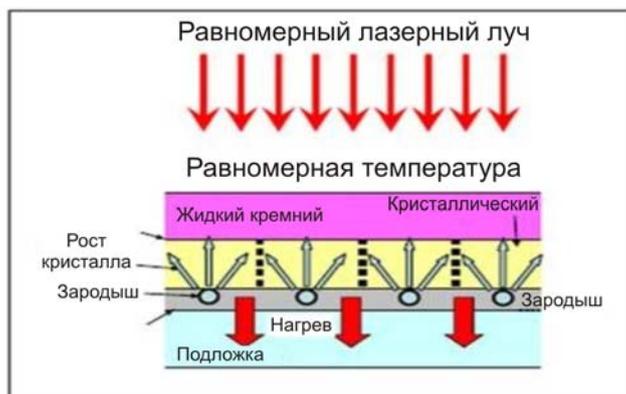


Историческое развитие TFT технологий.

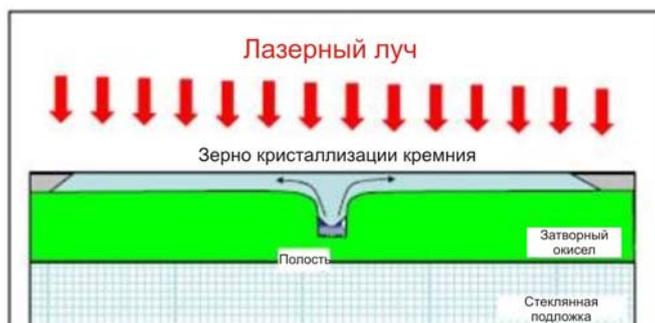


Подвижность аморфного и монокристаллического кремния

ЛАЗЕРНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ TFT– СТРУКТУР



Традиционная технология лазерной кристаллизации



Принципиальная схема кристаллизации по модифицированному методу Грохальского

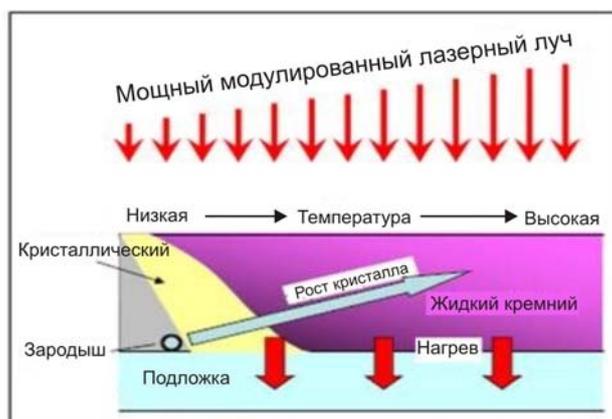
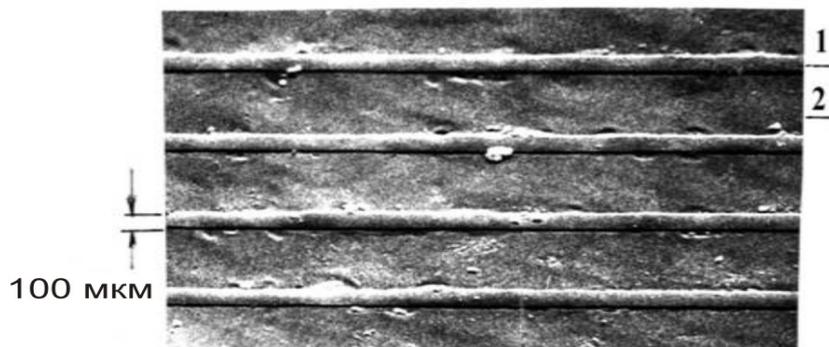
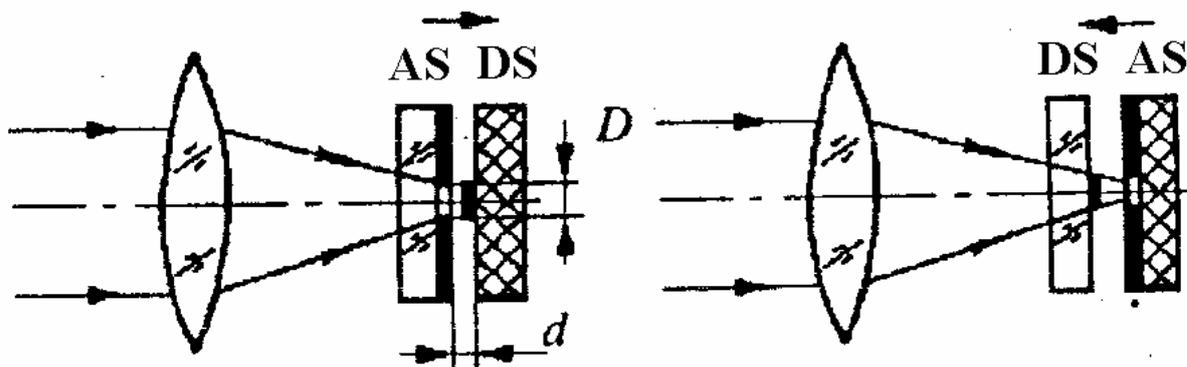


Схема латеральной лазерной кристаллизации

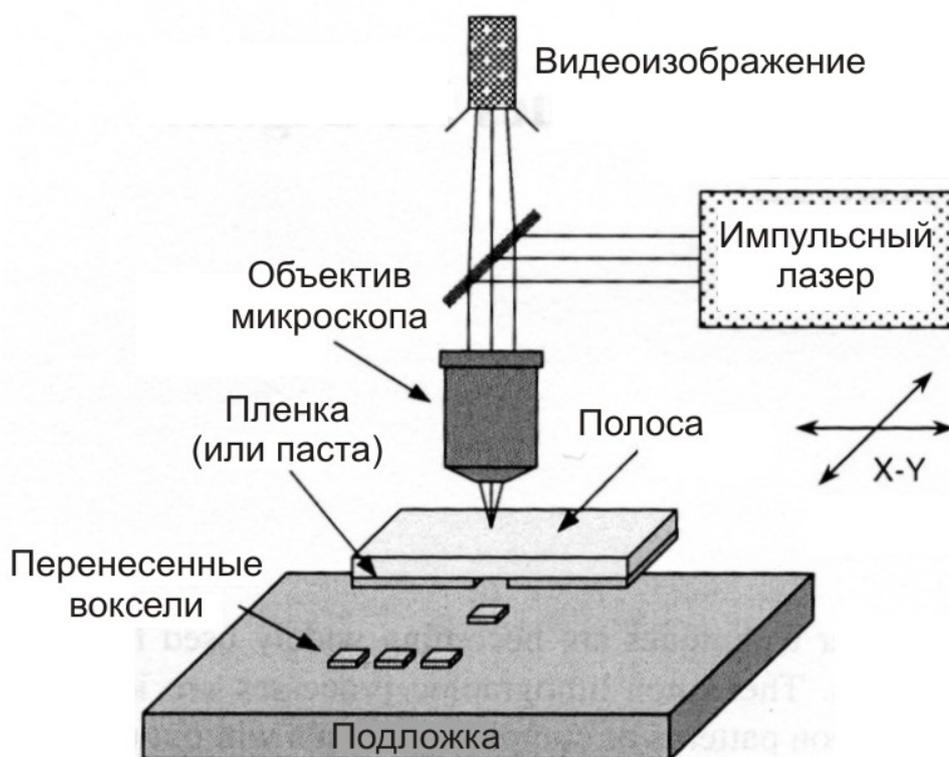


Лазерные монокристаллизованные полосы (1) поли–Si на изоляторе Si₃N₄ (2). YAG:Nd непрерывный, 20 Вт, двумодовый режим

ЛОКАЛЬНОЕ НАНЕСЕНИЕ ПЛЕНОК ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРОМ (1) ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЙ ПЕРЕНОС ПЛЕНОК (ЛИП)

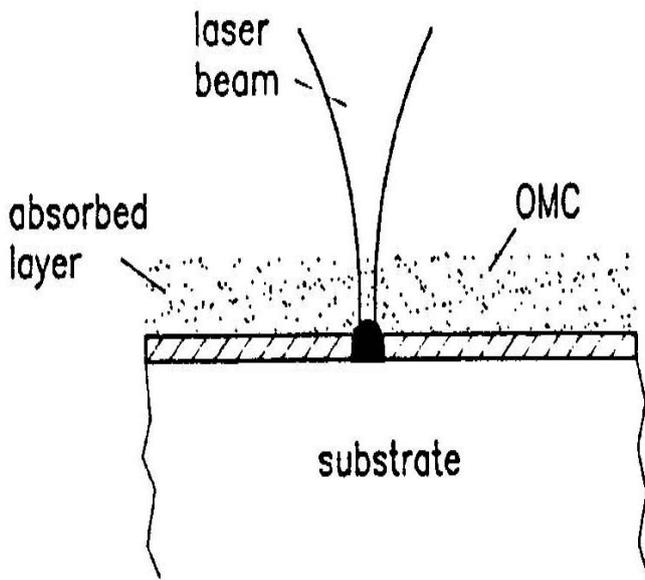


Принципиальная схема метода лазерного переноса:
а) прямого, б) обратного



Принципиальная схема лазерной установки
«прямой записи» методом переноса

ЛОКАЛЬНОЕ НАНЕСЕНИЕ ПЛЕНОК ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРОМ (2) ЛАЗЕРНО-ХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ИЗ ПАРОВОЙ ФАЗЫ (LCVD)



Схематическое изображение фотоактивных химических реакций разложения (LCVD) газофазных металлоорганических соединений (МОС)

Типичные экспериментальные условия для газофазного разложения МОС (LCVD):

плотность мощности лазерного излучения (W/cm^2): 10^3 – 10^4 в UV,

–100(непр.)– 10^6 (имп.), IR, концентрация МОС в газовой фазе (Torr) 0.1–10, скорость осаждения пленок (mcm/s) ≤ 0.1

Пленочные материалы для разложения (реакционные газы)

Bi [$Bi(CH_3)_3$]
W [$W(CO)_6$]
Cr [$Cr(CO)_6$]
Mo [$Mo(CO)_6$]
Al [$Al_2(CH_3)_6$]
Zn [$Zn(CH_3)_2$]
Cd [$Cd(CH_3)_2$]
Sn [$Sn(CH_3)_4$, $SnCl_4$]
Fe [$Fe(CO)_5$]
Si [$Si(CH_3)_4$, SiH_4]
Ge [$Ge(CH_3)_4$]
SiO₂ [$SiH_4 + H_2O$]
Si₃N₄ [$SiH_4 + NH_3 + N_2$]
Al₂O₃ [$Al(CH_3)_3 + N_2O$]
GaAs [$Ga(CH_3)_3 + As(CH_3)_3$]
Ga [$Ga(CH_3)_3$]
As [$As(CH_3)_3$]
I [CF_3I]
B [BCl_3]
P [PCl_3]
ZnO₂ [$Zn(CH_3)_2 + N_2O$]

ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА ТВЕРДЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТ НАНОЧАСТИЦ

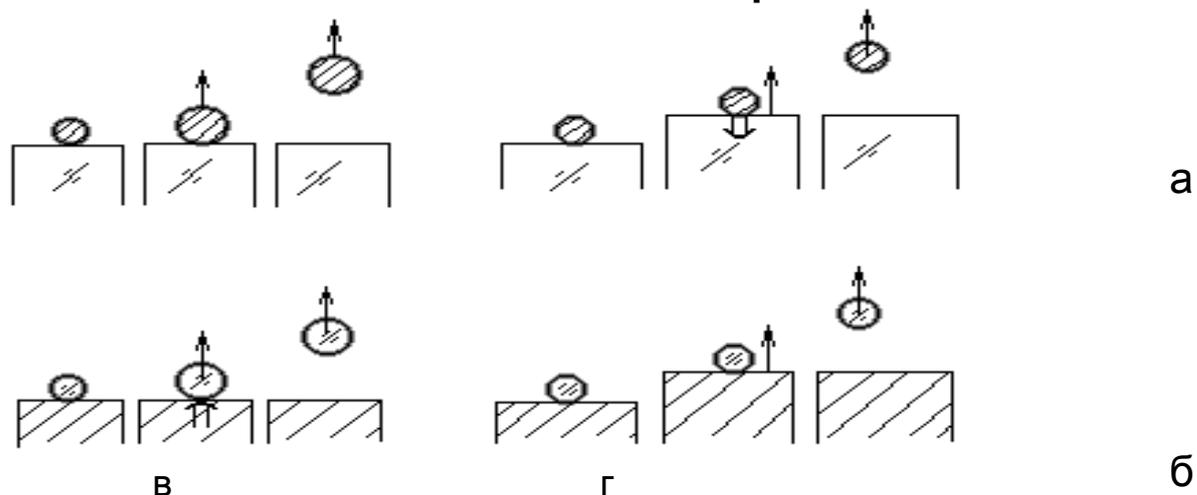
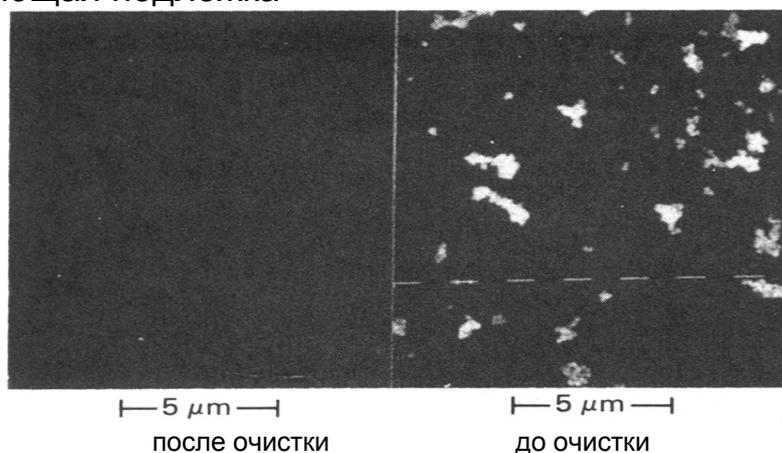


Иллюстрация физических механизмов сухой лазерной очистки
а – поглощающая частица, б – поглощающая подложка,
в – термическое расширение частицы, г – термическое расширение подложки



Иллюстрация физических механизмов влажной лазерной очистки:
а — поглощающая частица,
б — поглощающая подложка

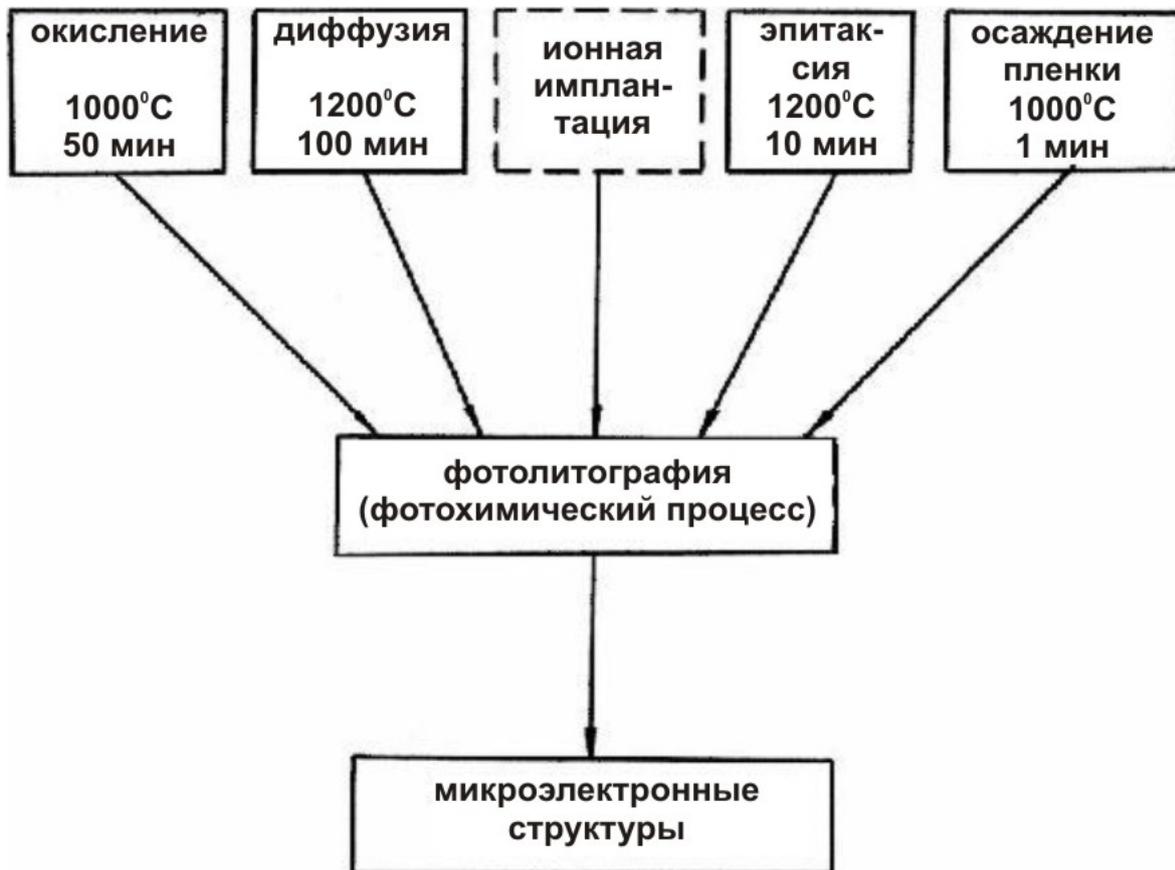


Поверхность Si подложки с 0.2 мкм Au частицами, KrF-лазер (0.2 Дж/см², 4 импульса, пленка воды)

2. ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ТОНКИХ ПЛЕНОК (ЛОТП)

**Общая концепция ЛОТП
Средства и методы ЛОТП
Точность и качество ЛОТП
Основные применения ЛОТП
Перспективы ЛОТП**

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СТРУКТУР (НА БАЗЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ)



ОСОБЕННОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МАТЕРИАЛЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

– высокая плотность фотонов – $N/(\text{см}^2 \cdot \text{с}) \cdot h\nu$, $N_{PF} \approx 10^{24} \text{ см}^{-2}$
приводит к фотохимическим реакциям и
многофотонным процессам

– заметное давление света

$$p_{\text{св}} = \varepsilon(1 + R),$$

при воздействии на малые прозрачные частицы,
(ε — объемная плотность энергии излучения, R -коэффициент отраже-
ния поверхности при нормальном падении света)

– высокая напряженность электрического поля
(быстропеременное - 10^{15} Гц, но напряженность соизмерима
с внутриатомной $\sim 10^5 - 10^6$ В/см)

$$E_l = \left(\frac{4\pi q}{\varepsilon c} \right)^{1/2}$$

(при $q \leq 10^6 - 10^7$ Вт/см², $f \approx 10^{15}$ Гц, $E_l \leq 10^5 - 10^6$ В/см)

– высокая плотность мощности – q (Вт/см²) $\sim q \geq 10^7 - 10^8$

$$q = \frac{W}{S\tau}$$

(W – энергия излучения, S – площадь сечения пучка, τ – длительность
воздействия)

которая может вызвать очень локальный $\sim 1 \mu^2$ и

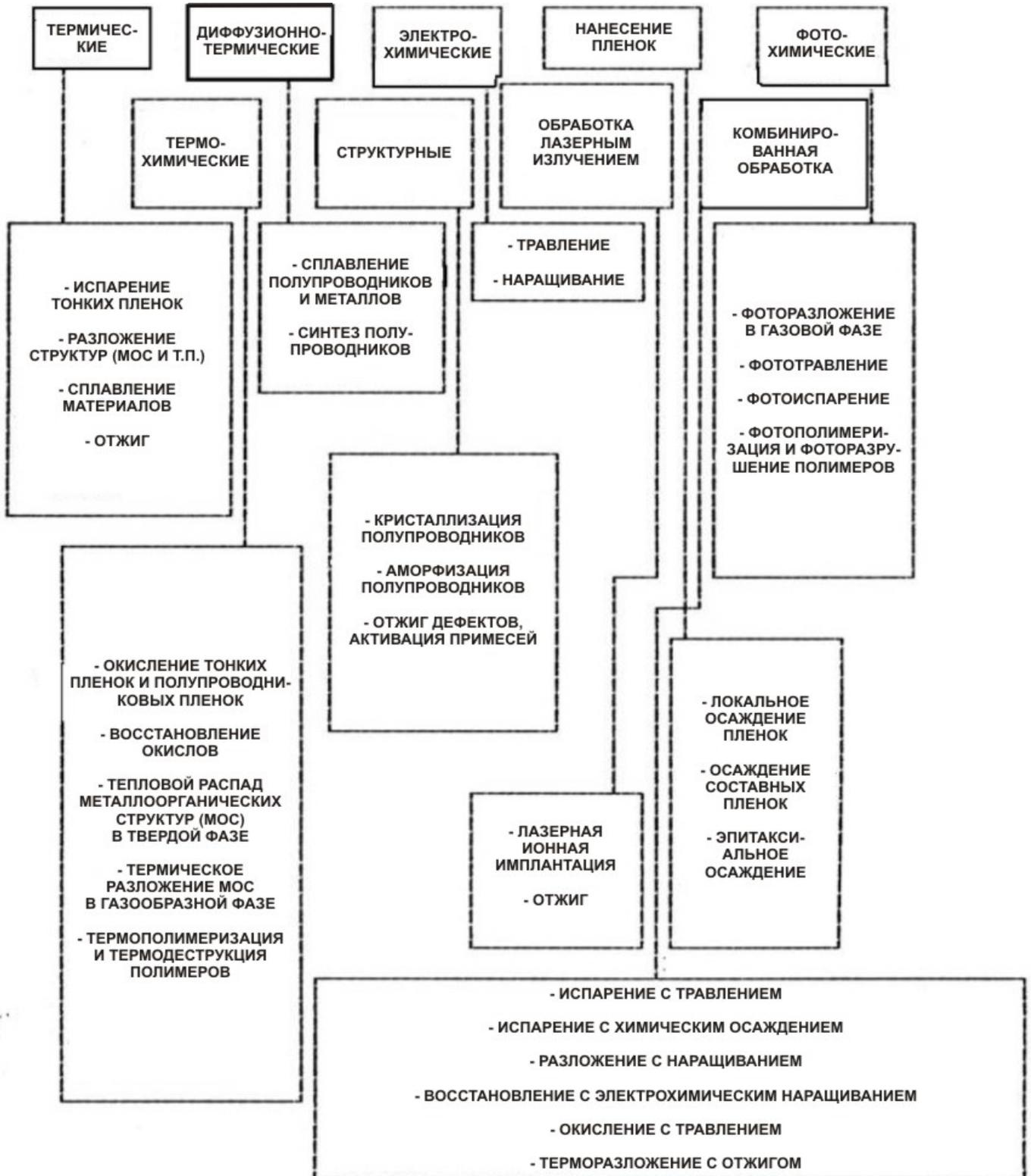
очень быстрый нагрев до температур $T \geq 5000$ К

со скоростями нагрева $\sim \frac{\partial T}{\partial t} \geq 10^{11}$ К/с и более

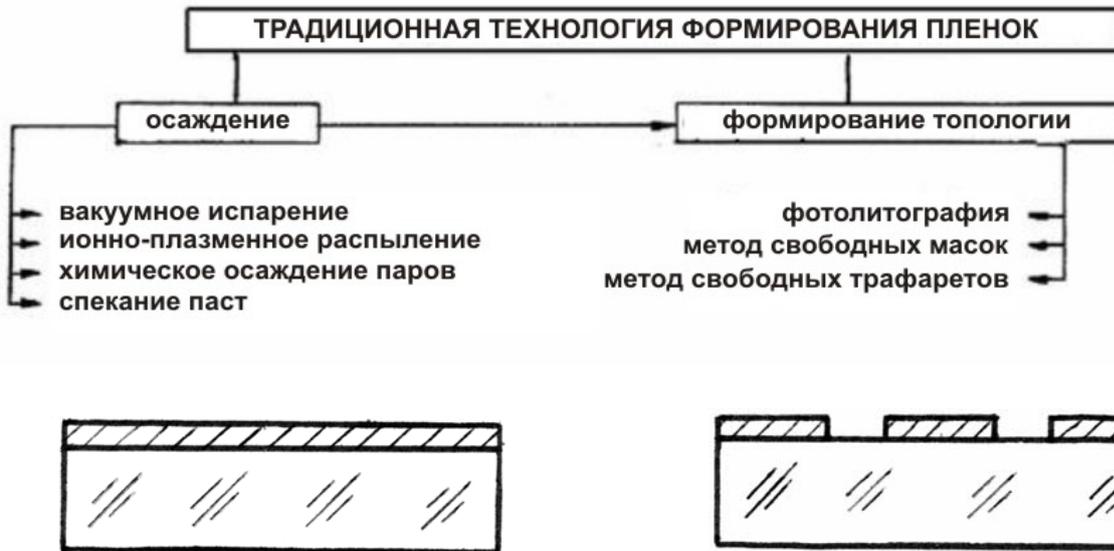
скоростями охлаждения $\sim \frac{\partial T}{\partial t} \geq 10^8$ К/с и более

при градиентах температуры $\sim \frac{\partial T}{\partial x} \geq 10^5 - 10^6$ К/см и более

ЛОКАЛЬНЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ, ВЫЗВАННЫЕ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ



ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ



НЕДОСТАТКИ: НЕВОЗМОЖНОСТЬ (ИЛИ СЛОЖНОСТЬ) ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКИХ ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К ТОЧНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ПЛЕНОК, ВСЛЕДСТВИЕ СЛЕДУЮЩИХ ПРИЧИН:

- сложная взаимосвязь между топологией и электрическими характеристиками элементов пленки (особенно с распределенными параметрами),
?
- недостаточная точность параметров пленок в процессе осаждения,
– недостаточная воспроизводимость состава и свойств пленок,
- невозможность или сложность точной реализации параметров пленочных элементов.

ТРЕБУЕТСЯ ПОДСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ,
которая осуществляется различными методами
– МЕХАНИЧЕСКИМИ, ХИМИЧЕСКИМИ,
ТЕРМИЧЕСКИМИ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ



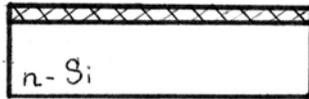
ВСЕ ЭТИ МЕТОДЫ НЕ УНИВЕРСАЛЬНЫ И ТЕХНИЧЕСКИ НЕ СОВЕРШЕННЫ.

КАКОВ ЖЕ ВЫХОД?

СРАВНЕНИЕ ТРАДИЦИОННОЙ И ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ P-N ПЕРЕХОДОВ

ТРАДИЦИОННАЯ

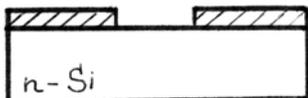
1. ОКИСЛЕНИЕ



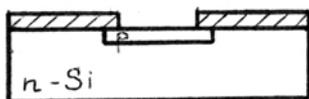
2. ФОТОЛИТОГРАФИЯ

(5 основных операций):

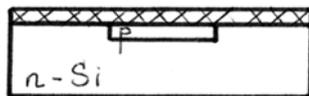
- нанесение фоторезиста (ФР)
- экспонирование ФР
- проявление ФР
- травление ФР
- удаление ФР



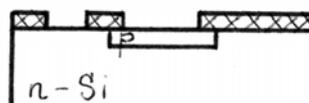
3. ДИФФУЗИЯ



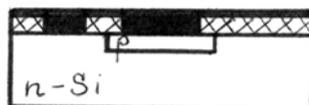
4. ОКИСЛЕНИЕ



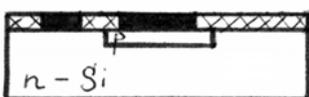
5. ФОТОЛИТОГРАФИЯ



6. ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНКИ

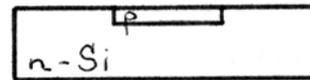


7. ТРАВЛЕНИЕ

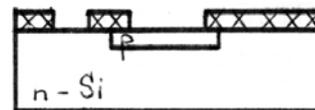


ЛАЗЕРНАЯ

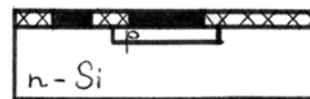
1. ЛОКАЛЬНАЯ ДИФФУЗИЯ



2. ЛОКАЛЬНОЕ ОКИСЛЕНИЕ



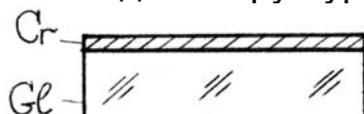
3. ЛОКАЛЬНОЕ ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНКИ



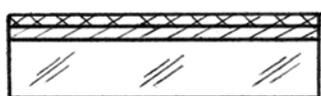
СРАВНЕНИЕ ТРАДИЦИОННОЙ И ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ФОТОШАБЛОНОВ

ТРАДИЦИОННАЯ
ТЕХНОЛОГИЯ, МЕТОД
ФОТОЛИТОГРАФИИ

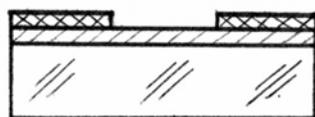
1. Исходная структура



2. Нанесение ФР



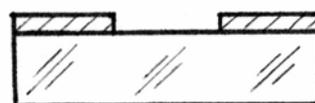
3. Экспонирование ФР



4. Травление хрома



5. Удаление ФР

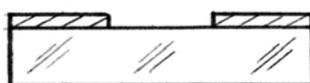


ЛАЗЕРНОЕ
ЛОКАЛЬНОЕ
ИСПАРЕНИЕ

1. Исходная структура



2. Локальное окисление



ЛАЗЕРНОЕ
ЛОКАЛЬНОЕ
ОКИСЛЕНИЕ С
ТРАВЛЕНИЕМ

1. Исходная структура



2. Локальное окисление



3. Травление хрома



4.

Здесь показаны лишь основные операции без промывки и сушки

2.2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК

2.2.1. ЛАЗЕРЫ ДЛЯ ЛОТП

–ИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ*

обеспечивает минимальное нагревание подложки, т.к. количество тепла, накопленного подложке, пропорционально времени воздействия, а также оптимизирует все энергетические и точностные характеристики ЛОТП.

–МИНИМАЛЬНАЯ ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ИМПУЛЬСА

– уменьшает глубину прогретого слоя $x_{пр}$ в подложке,

$$x_{пр} \sim \sqrt{a\tau},$$

– снижает пороговую плотность энергии испарения пленки $q \sim \sqrt{a\tau}$, более того, так как время воздействия сокращается, часть энергии, которая при большой длительности импульса тратилась на нагрев подложки, используется для нагрева пленки, поэтому доля энергии, пошедшей на испарение пленок возрастает на несколько порядков от 10^{-2} – 10^{-3} при $\tau = 10^{-3}$ до 0.5–0.7 при $\tau = 10^{-8}$,

– обеспечивает наименьшие термические искажения топологии и и, вследствие этого, высокую точность ЛОТ

— МОЩНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ

должна быть достаточной для испарения материала пленки, т.е. должна превышать порог разрушения пленки, с учетом потери потерь в оптической системе и на отражение,

*)В некоторых случаях могут быть использованы непрерывные лазеры при быстром сканировании пучка, так чтобы время воздействия $\tau = d/v$ (d – диаметр пучка, v — скорость сканирования) было достаточно коротким.

При обработке короткими импульсами (~ 10 нс)
 $q_{пор} \sim 10^8$ Вт/см² для различных материалов, что при облучении зон размером $d \sim 100$ мкм с учетом 50% потерь в оптике дает $P_{max} \sim 5 \cdot 10^4$ Вт. Отметим, что обработка меньших зон возможна и при меньшей мощности и для $d \sim 10$ мкм с учетом потерь $P_{min} \sim 10^3$ Вт и даже менее.

– ДЛИНА ВОЛНЫ ЛАЗЕРА

выбирается на основе следующих соображений: желательно, чтобы длина волны лежала в области наименьшего поглощения подложки (для предотвращения повреждения структуры) и наибольшего поглощения пленки; и с учетом дополнительных требований, например, прозрачности стекла баллона при обработке вакууммированных элементов для обеспечения его сохранности и т.п.

– ЧАСТОТА ПОВТОРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ

должна обеспечивать необходимую производительность; что обычно обуславливает выбор лазерных источников с максимальной частотой повторения импульсов. При этом необходимое перекрытие пятен ($p \leq 1$ при подгонке и $p \geq 1$ при размерной обработке) может быть достигнуто подбором подходящей скорости движения столика.

– Лазерное излучение должно характеризоваться высокой
**РАВНОМЕРНОСТЬЮ ПУЧКА И СТАБИЛЬНОСТЬЮ
ИЗЛУЧАЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ.**

–С точки зрения применения лазеров для создания технологического оборудования, лазеры должны обладать надлежащими рабочими характеристиками: достаточным **СРОКОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ И НАДЕЖНОСТЬЮ, МИНИМАЛЬНЫМ ВЕСОМ И РАЗМЕРОМ, ПРОСТОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ.**

ТИПИЧНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЛАЗЕРОВ ДЛЯ ФОТОЛИТОГРАФИИ

ИМПУЛЬСНЫЕ ЛАЗЕРЫ

Тип лазера	Длина волны λ , мкм	Энергия импульса W_{ε} , Дж	Длительность импульса τ , с	Частота следования импульсов f , Гц	Область применения
Nd:YAG с акусто-оптической модуляцией добротности	1.06	0.01–1.0	10^{-7}	10^3 – 10^4	П, РО, ЛЛ
Nd:YAG с электро-оптической модуляцией добротности	1.06	0.1–1.0	$2 \cdot 10^{-8}$	50–500	П, РО, ЛЛ
Азотный (N ₂)	0.337	10^{-4} – 10^{-3}	10^{-8}	10^3 – 10^4	П, РО, ЛЛ
На парах меди (Cu)	0.51	10^{-3} – 10^{-2}	$2 \cdot 10^{-8}$	10^4	ЗИ, ЛЛ
Экимерный Ar–Kr–F ₂	0.248	0.1–10	10^{-8}	10–500	ЛФЛ
Полупроводниковый GaI GaAs GaAs	0.82–0.906	Мощность импульса $P_H=W/t$ 30–70 W		10^3 – 10^4	ЗИ

НЕПРЕРЫВНЫЕ ЛАЗЕРЫ (СО СКАНИРУЮЩИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ)

Тип лазера	Длина волны λ , мкм	Мощность P , Вт	Область применения
Nd: YAG	1.06	100	РО, ЛЛ
Ar	0.5	20	ЗИ, ЛЛ
He–Cd	0.442	0.12	ЗИ, ЛФЛ
CO ₂	10.6	10^2 – 10^3	П

Сокращения:

П — подгонка, РО — размерная обработка, ЛЛ — лазерная литография, ЛФЛ — лазерная фотолитография, ЗИ — запись информации,

СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ЛАЗЕРОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Лазеры	Параметры								Параметры для обработки					ИТОГО
	Техническ.				Экономич.				Точность	Стойкость	Производительность	Стойкость	Сумма	
типы	λ	t	f	W_c	С	Н	Г	С						Т
	ДЛИНА ВОЛНЫ	ДИСТАНЦИЯ	ЧСТОТА ИМПУЛЬСОВ	ЭНЕРГИЯ ИМПУЛЬСА	СТОЙКОСТЬ	НАДЕЖНОСТЬ	ГАБАРИТЫ	СУММА						
Nd:YAG с Акусто-опт. модуляцией добротности	4	2	1	1	3	2	3	16	4	4	1	3	12	28
N ₂	2	1	3	4	1	1	1	13	2	1	4	1	8	21
Экимерный ArKгF	1	1	4	2	4	4	4	20	1	2	3	4	10	30
На парах Cu	3	1	2	3	2	3	2	16	3	3	2	2	10	26
CO ₂ (импульсный)	6	6	4	2	3	2	4	27	6	3	2	3	14	41
Ar	3	5	4	5	4	3	3	27	5	4	4	3	16	43

Здесь использован метод экспертных оценок, когда баллы означают порядок приоритетного использования. Лучший тип лазера обладает наименьшей суммой баллов.

2.2.2. ОПТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ДЛЯ ЛОТП

Оптическая система для лазерной обработки тонких пленок должна соответствовать двум основным условиям: энергетическим и точностным.

Энергетические требования:

- плотность светового потока, достаточную для проведения требуемых операций на обрабатываемой поверхности;
- минимальные потери энергии лазерного излучения на диафрагмах (виньетирование) и оптических компонентах (френелевские отражения и остаточное поглощение).

Точностные требования:

- необходимость формирования четко очерченной зоны воздействия заданной формы;
- минимальная неровность контура облученной зоны.

Особые требования к оптике энергетического канала:

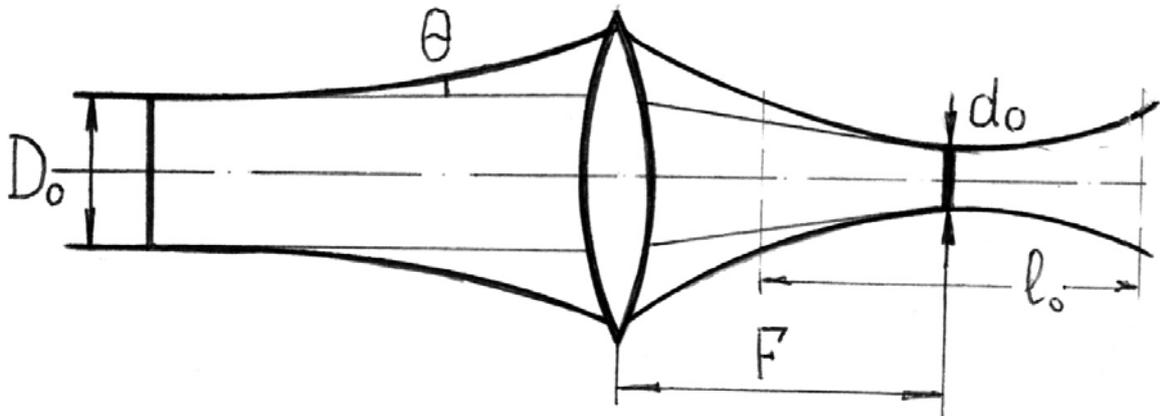
- обеспечение сохранности (оптической прочности) оптических компонентов, особенно фотошаблона (маски);
- равномерность освещения зоны обработки, которая существенным образом влияет на все условия и результаты обработки (в том числе и на стойкость элементов энергетического канала).

Наконец, последнее условие, которое следует принимать во внимание, когда все вышеперечисленные учтены:

- размеры всей системы должны быть минимальны.

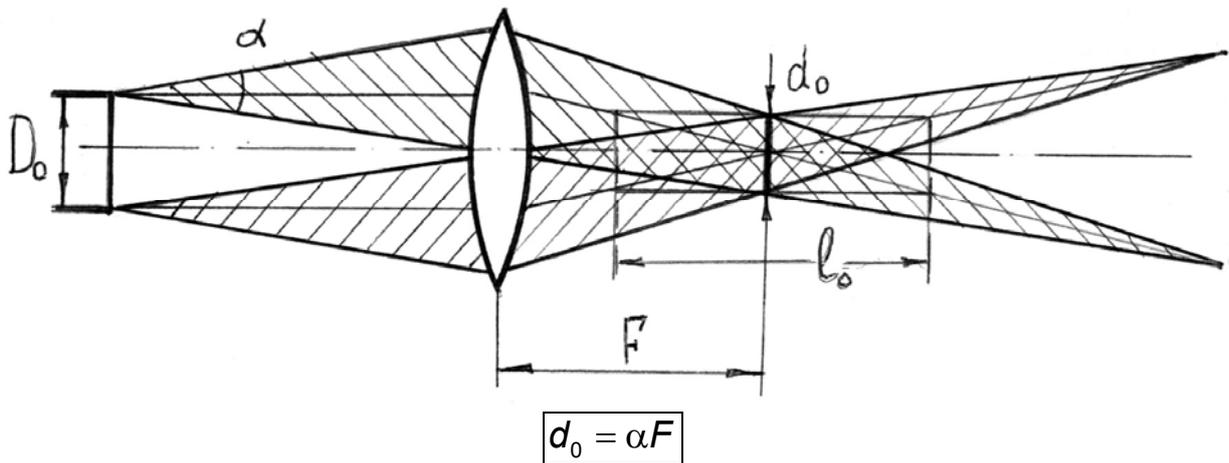
ФОКУСИРУЮЩИЙ МЕТОД

1. ГАУССОВА МОДЕЛЬ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (ОДНОМОДОВОГО)



$$\theta = \alpha/2$$

2. ТЕЛЕЦЕНТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (МНОГОМОДОВОГО)



Для $\alpha = 10^{-3}$ рад (YAG:Nd, N₂)

$F = 1$ см

$d_0 = 10$ мкм

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

Тип лазерного пучка	Теоретический параметр лазерного пучка		
	Полный угол расходимости пучка $\alpha = 2\theta$	Диаметр фокального пятна $d_0 = \alpha F$	Распределение интенсивности в фокальном пятне
Гауссовый — од- номодовый	$1.26 \frac{\lambda}{D}$	$1.26 \frac{\lambda}{D} F$	
Супергауссовый— многомодовый	$1.26 \frac{\lambda}{D} \sqrt{N_n}$	$1.26 \frac{\lambda}{D} \sqrt{N_n} F$	
Равномерно рас- пределенный — дифракционно ограниченный	$2.44 \frac{\lambda}{D}$	$2.44 \frac{\lambda}{D} F$	
Теоретический (дальнепольный) предел	$\sim \frac{\lambda}{D}$	$\sim \lambda$	

Но:

Что такое d_0 ?

Минимальный размер области воздействия ?

И что произойдет
если интенсивность воздействия на материал
будет $I > I_{пор}$ в области d_0 ?

Ответ дан ниже

ФОКУСИРУЮЩИЙ МЕТОД

Фокусирующий метод характеризуется:

- простотой,**
- полным использованием лазерной энергии и**
- оптическим разрешением (размером фокального пятна), определяемым расходимостью пучка и фокусным расстоянием оптической системы.**

Оценка в случае Nd:YAG лазера ($\alpha_l \approx 10^0$, $F = 1$ см) дает $d_0 = 30$ мм.

Дальнейшее сокращение размера фокального пятна может быть достигнуто расположением перед объективом увеличивающей поперечный размер пучка **телескопической системы**, обладающей увеличением Γ , (см рис.) (уменьшение расходимости в Γ раз). Этим приемом можно или сократить d_0 , или увеличить фокусное расстояние объектива F без изменения d_0 : $d_0 = \alpha F / \Gamma$.

Использование телескопической системы в установке “Квант–3” привело к получению фокального пятна диаметром 5 мкм с объективом с фокусным расстоянием 70 мм. Большая величина фокусного расстояния позволяет расположить (если это необходимо) образец с различными зондами, контактные измерительные и другие устройства, которые, например, важны при автоматической подстройке резисторов.

Главные недостатки фокусирующего метода:

- неравномерное распределение интенсивности в фокальном пятне и**
- непостоянство размера зоны воздействия, который зависит от порога чувствительности материала, а также**
- сложность обеспечить достаточную точность края зоны воздействия, в том числе при сканировании пучка.**

Разработаны различные способы управления траекторией сфокусированного пучка. В настоящее время традиционный метод перемещения столика с закрепленным на нем образцом часто заменяется на сканирующие методы.

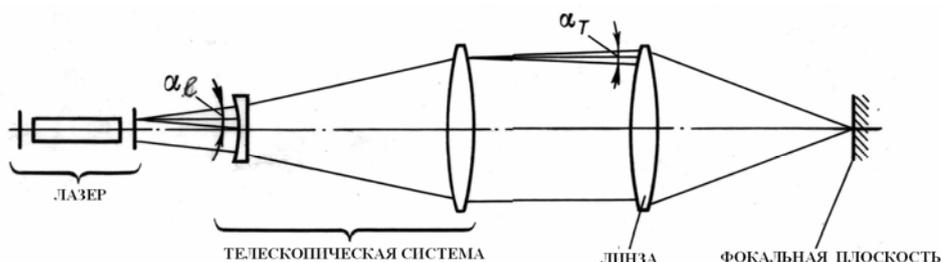
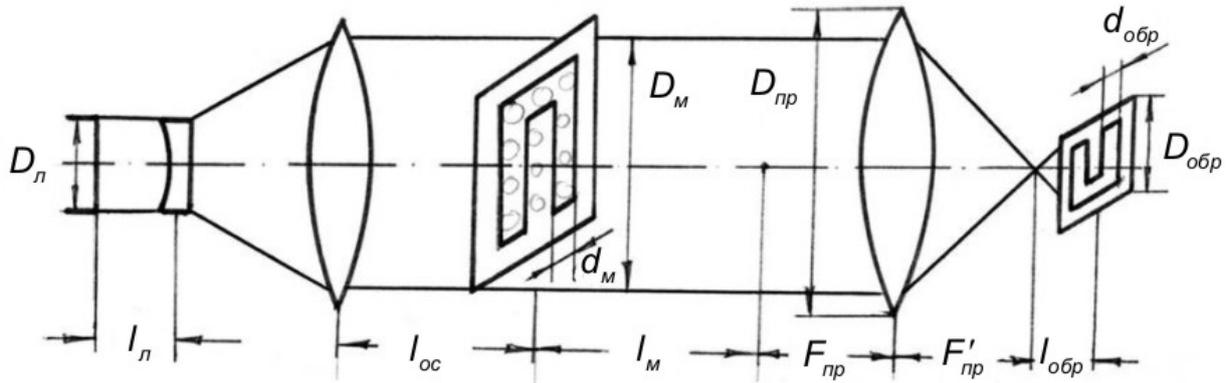


Рис. Схема фокусирующего метода с телескопической системой

ПРОЕКЦИОННЫЙ МЕТОД (микропроекция)



Габаритный расчет:

Увеличение осветительной системы: Увеличение проекционной системы:

$$\beta_{ос} = \frac{D_M}{D_л} = \Gamma_T \quad (1)$$

$$\beta_{пр} = \frac{D_{обр}}{D_M} = \frac{l_{обр}}{F_{пр}} = \frac{F'_{пр}}{l_M} \quad (2)$$

$$\beta_{ос}^{max} = \sqrt{\frac{Q_л}{Q_M}} \quad (3)$$

$$\beta_{пр}^{max} = \sqrt{\frac{Q_M^{пор}}{Q_{обр}^{пор}}} \quad (4)$$

$\beta_{ос}^{max}$ — максимальное увеличение осветительной системы

$\beta_{пр}^{max}$ — максимальное увеличение проекционной системы

Зная $\beta_{ос}$ и $\beta_{пр}$, можно определить главные размерные параметры схемы D_M , d_M , l_M и $l_{обр}$.

Энергетический расчет (Q — плотность энергии)

$$Q_M = \frac{Q_л}{\beta_{ос}^2}$$

$$Q_{обр} = \frac{Q_л}{\beta_{ос}^2 \beta_{пр}^2}$$

$$Q_M^{пор} \beta_{ос}^2 > Q_л > Q_{обр}^{пор} \beta_{ос}^2 \beta_{пр}^2$$

Пример. Дано:

$D_{обр} = 1$ мм, $d_{обр} = 5$ мкм, $D_л = 1$ см, $d_M = 100$ мкм, из формулы (2) $\beta_{пр} = 1/20$, $D_M = 2$ см, из формулы (1) $\beta_{ос} = 2$, если $F_M = 5$ см, $l_M = 1$ м.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ПРОЕКЦИОННОГО МЕТОДА

1. Потери энергии

$$\eta = \frac{P_{обр}}{P_{л}}$$

Чем сложнее форма маски, тем меньше η

2. Противоречие между разрешающей способностью и размером поля изображения:

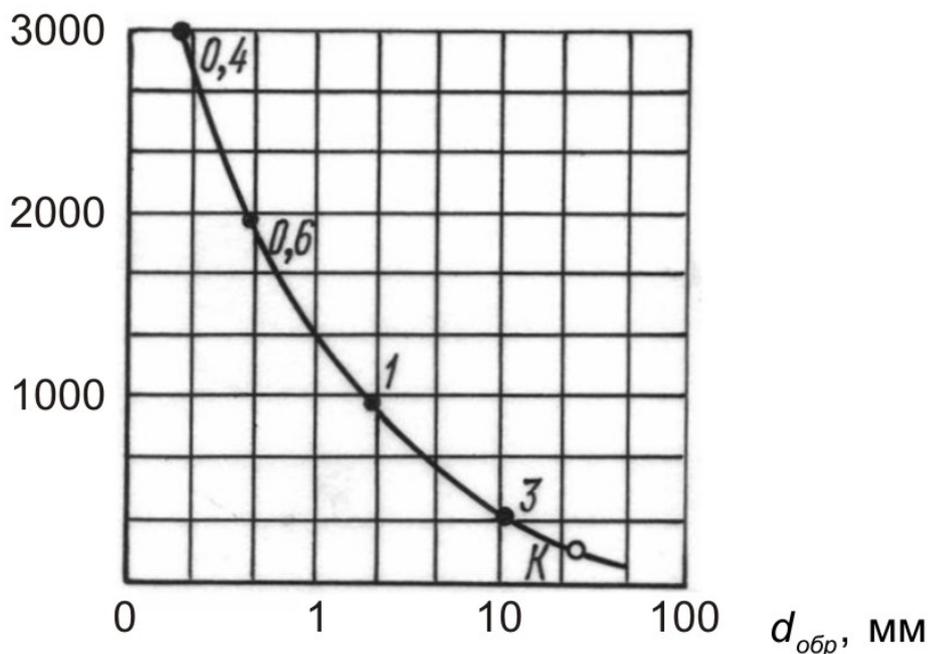
$$\text{Так как } \beta_{пр} = \frac{D_{обр}}{D_{м}} = \frac{d_{обр}}{d_{м}}$$

Если нужно большое разрешение, значение $\beta_{пр}$ должно быть наименьшим ($\beta_{пр} < 1$) — большой масштаб проекции.

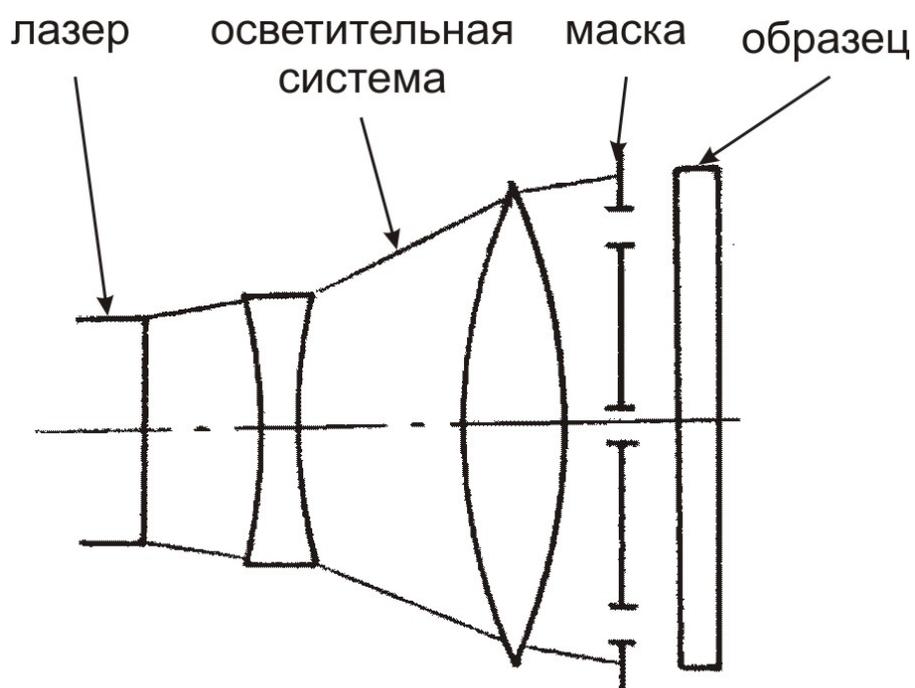
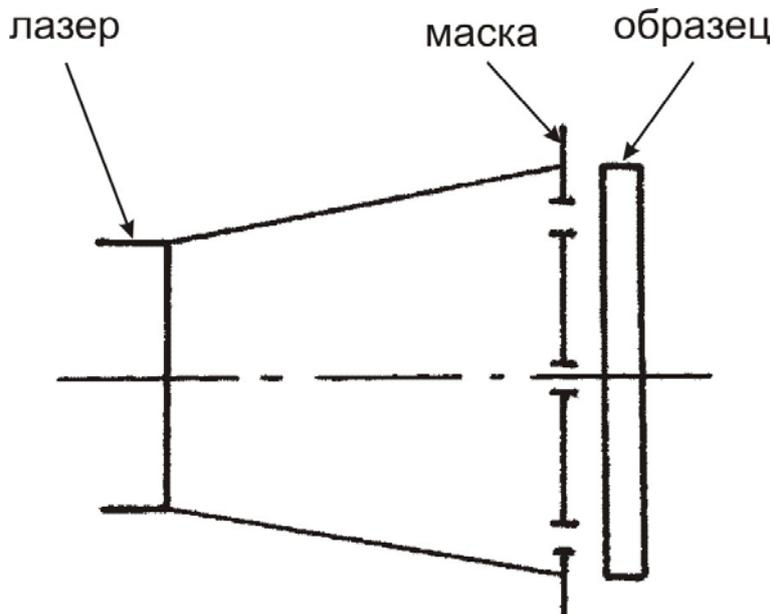
Но если масштаб $D_{м}$ будет больше, чем $D_{пр}$.

Пример: пусть $d_{обр} = 1$ мкм, $D_{обр} = 30$ нм, $d_{м} = 100$ мкм тогда $\beta_{пр} = 100$ и $D_{м} \approx D_{пр} = 3$.

δ , лин/мм



КОНТАКТНАЯ (ТЕНЕВАЯ) СХЕМА (упрощается оптическая схема)

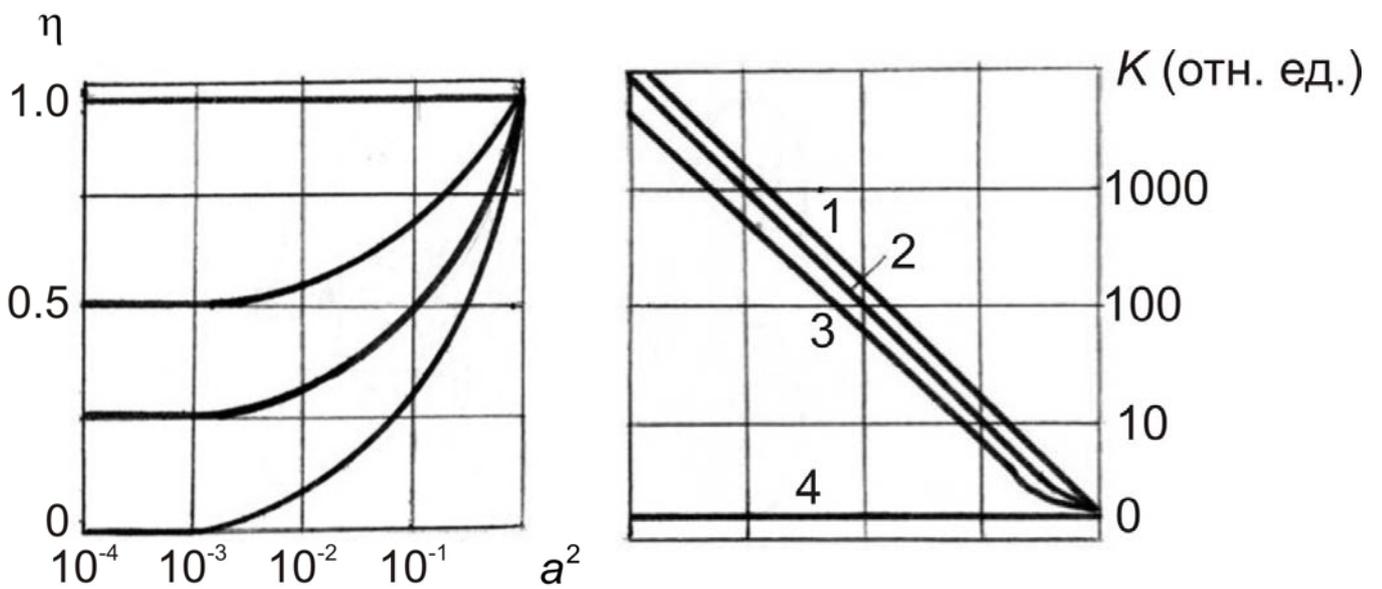
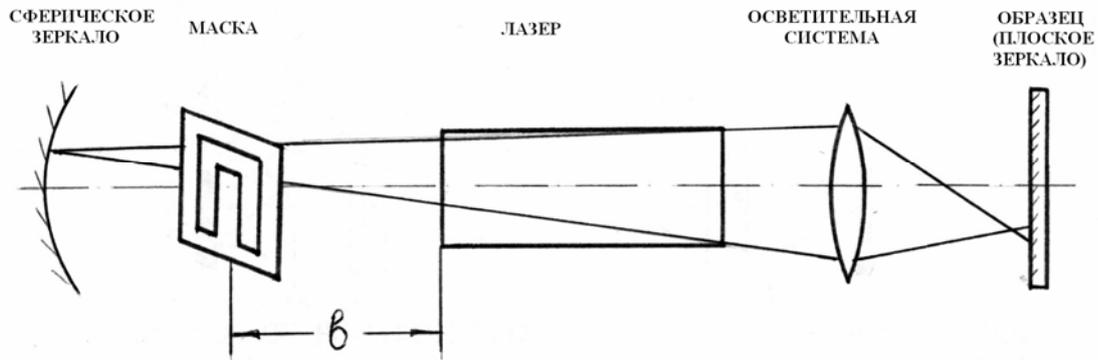


Оптические схемы контактных (теневых) методов формирования изображения

$$\beta_{\text{пр}} = 1, Q_{\text{л}} = Q_{\text{м}} = Q_{\text{обр}}$$

$$Q_{\text{м}}^{\text{пор}} > Q_{\text{обр}}^{\text{пор}}$$

АКТИВНЫЙ ПРОЕКЦИОННЫЙ МЕТОД



η — энергетическая эффективность, $a = \frac{D_M}{D_n}$

k — плотность мощности

1 — $b = \infty$

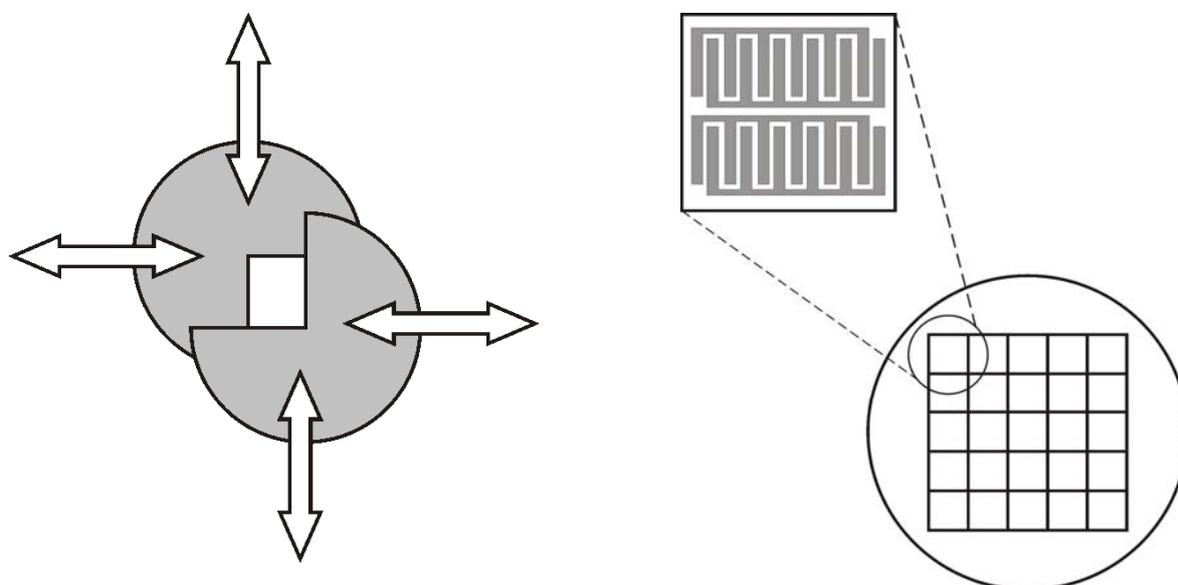
2 — $b = 4$

3 — $b = 0$

4 — традиционный микропроеционный метод

4.4. КОМБИНИРОВАННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

На практике большое распространение получили **комбинированные методы формирования изображения**, когда элемент изображения строится методом **оптической проекции**, а поле обработки **перекрывается сканированием пучка** (например, перемещением стола). К таким методам относятся **мультиплицирование изображения** и **фотонабор**, применяемые в фотолитографии и некоторые другие. В лазерных технологиях наибольшее распространение из таких методов получил **сканирующий проекционный** или **контурно–проекционный** [3, 4].



*Принципиальные схемы
метода фотонабора (а) и метода мультипликации (б)*

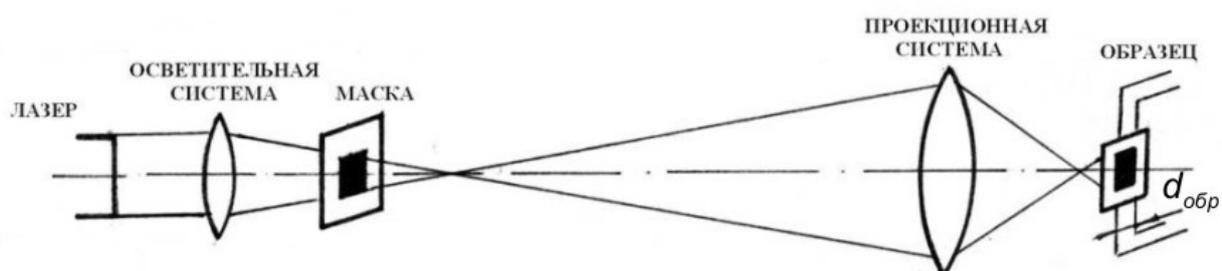
Принцип метода фотонабора заключается в синтезе (наборе) изображения из элементарных частей (базовых элементов) путем последовательного экспонирования пятном с изменяющимся размером и формой в плоскости изображения. Для изменения геометрии пятна могут быть использованы подвижные диафрагмы

Метод мультиплицирования (размножения) изображений осуществляется многократным последовательным или параллельным нанесением повторяющегося топологического рисунка. Различают оптико-механическую и оптическую мультипликацию.

ПРОЕКЦИОННО-СКАНИРУЮЩИЕ МЕТОДЫ.1 контурно-проекционный метод

Проекционно–сканирующие (контурно–проекционные) методы состоят в том, что изображение синтезируется в результате последовательного обхода по контуру световым пучком специального сечения, которое представляет собой микропроекцию простого элемента, например, квадрата. Схема контурно–проекционного метода аналогична схеме проекционного метода, но осветительная система работает с увеличением, меньшим 1.

Обход заданного контура на обрабатываемой поверхности осуществляется перемещением рабочего стола, на котором располагается изделие, по программе или при использовании оптического плоттера.



$$\text{Потери энергии лишь } \eta = \frac{2r^2}{\pi r^2} \approx \frac{2}{3}$$

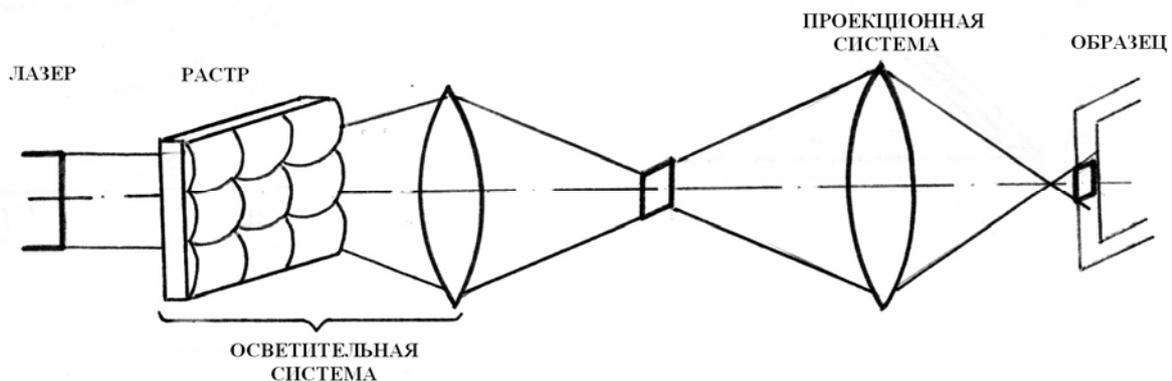
Нет противоречия между $d_{обр}$ и $D_{обр}$

Достоинствами контурно–проекционного метода (КПМ) формирования оптического изображения являются: независимость размеров общего поля изображения от разрешающей способности; высокая точность рисунка (вследствие использования элемента, образующего изображение, прямоугольной формы и равномерности распределения в нем энергии); высокая разрешающая способность; небольшие потери энергии на маске.

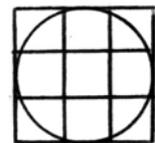
ПРОЕКЦИОННО-СКАНИРУЮЩИЕ МЕТОДЫ, 2 растрово–проекционный метод

Заметим, что рассмотренное выше положение маски в плоскости изображения выходного окна лазера не является единственно возможным. Иной принцип построения осветительных систем — использование телескопа или расположение маски вблизи фокальной плоскости осветительной системы. Преимуществами таких осветительных систем являются значительно меньшие габаритные размеры и более равномерное распределение интенсивности излучения.

Одной из разновидностей КПМ является **растрово–проекционный** способ, в котором материальная маска отсутствует, а изображение элемента строится с помощью раstra линз соответствующей формы (например, квадратной).

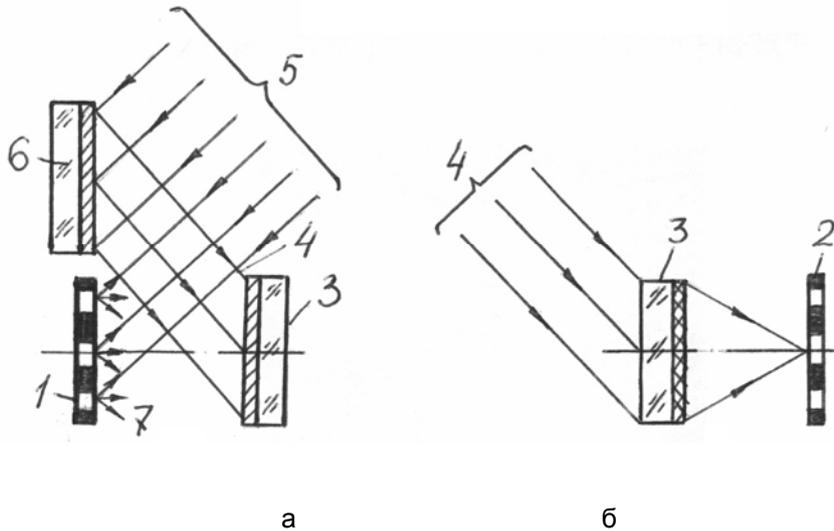


- потери энергии только из-за рассеяния и френелевских отражений не на растре
- высокая однородность распределения энергии



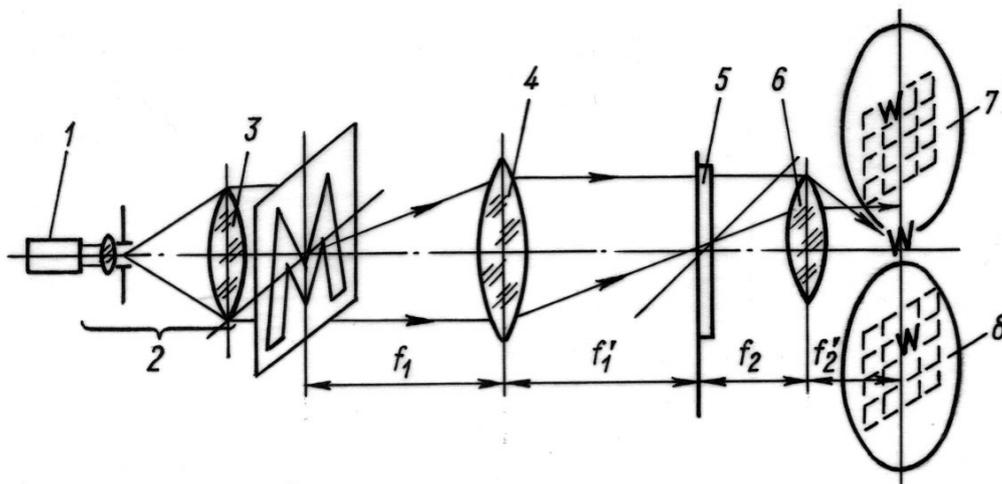
Для осуществления **трехмерной (рельефной) обработки** поверхности могут быть использованы различные модификации метода, например, контурно-проекционный метод с «дрожащей» маской (колеблющейся вдоль оптической оси системы по заданному закону в процессе перемещения облученной области по обрабатываемой поверхности), а также применение в микропроекционной схеме полутонных масок с переменным пропусканием.

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД



Запись голограммы (а) и восстановление (б)

1 — регистрируемый объект, 2 — реальное восстановленное изображение, 3 — детектор (фотопластинка), 4 — основной пучок, 5 — объектный пучок, 6 — зеркало, 7 — восстанавливающий пучок.



Метод мгновенного увеличения изображений с помощью голографии Фурье.

1 — лазер; 2 — телескопическая система; 3 — маска; 4, 6 — объективы; 5 — голографический фильтр; 7 — ; 8 — подложка.

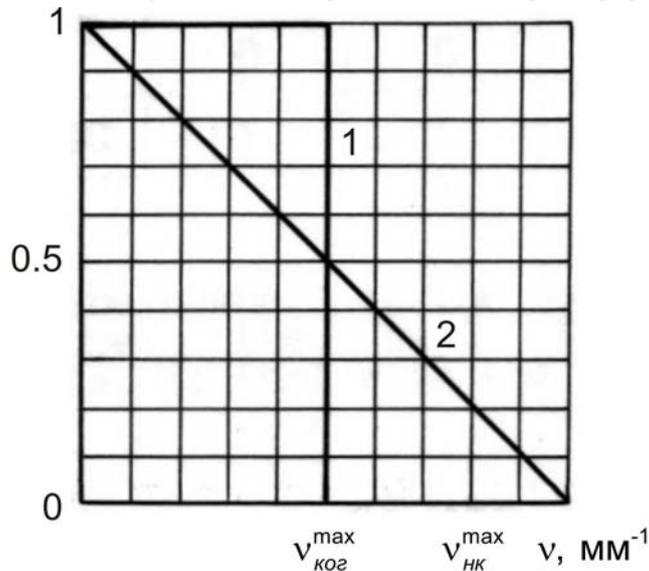
121 изображение на 5 см² с разрешением 3 мм
(иногда 1 мм)

РОЛЬ КОГЕРЕНТНОСТИ СВЕТА, ЯВЛЕНИЯ ДИФРАКЦИИ, ИНТЕРФЕРЕНЦИИ



С помощью когерентного света можно выявить оптические недостатки.

РАЗЛИЧИЯ В ФОРМИРОВАНИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ
ПРИ КОГЕРЕНТНОМ И НЕКОГЕРЕНТНОМ ОСВЕЩЕНИИ



В случае когерентного света самое высокое значение пространственной частоты $\nu_{\text{КОГ}}^{\text{max}}$ в два раза меньше, чем при некогерентном свете $\nu_{\text{НК}}^{\text{max}} = D/(\lambda f)$, где D – диаметр пучка, f – фокальное расстояние системы, λ – длина волны).

В тоже время для когерентного света оптическая передаточная функция не зависит от изменений переносимой частоты, тогда как для некогерентного она монотонно убывает с возрастанием пространственной частоты.

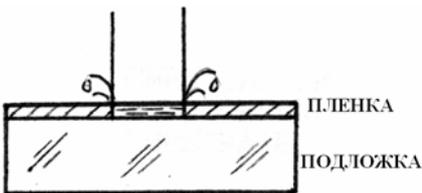
СРАВНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Метод	Параметр					Итого
	Разрешение	Точность воспроизведения изображения	Энергетическая эффективность	Производительность	Простота реализации	
Фокусирующий	2	5	1	3	2	13
Микро проекционный	5	3–4	4	2	4	19
Контурно-проекционный	3	2	3	4	3	15
Активный проекционный	4	3–4	2	5	5	19
Контактный (теневой)	6	6	5	1	1	19
Голографический	1	1	6	6	6	20

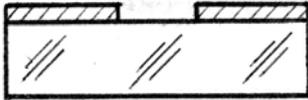
Примечание: числа в таблице показывают, какой метод более предпочтителен для использования; у лучшего метода итоговая сумма наименьшая.

2.2.3. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТОПОЛОГИИ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ

1. УДАЛЕНИЕ ПЛЕНКИ
(ИСПАРЕНИЕ +
АБЛЯЦИЯ)

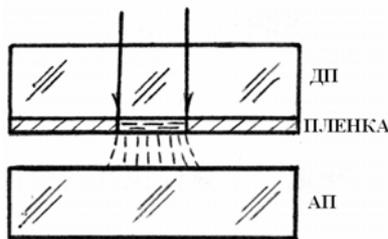


1. испарение (удаление)

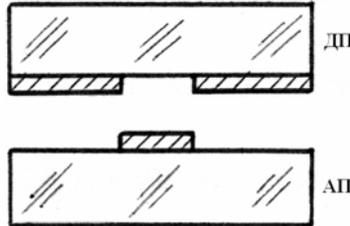


2. результат — отверстие в пленке

2. ЛОКАЛЬНОЕ
ОСАЖДЕНИЕ
ПЛЕНКИ (ЛАЗЕРНЫЙ
ПЕРЕНОС)

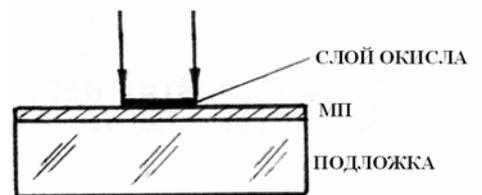


1. экспонирование
(испарение)

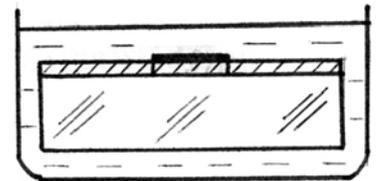


2. результат — конденса-
ция пленки

3. ЛОКАЛЬНОЕ
ОКИСЛЕНИЕ ПЛЕНКИ
+ СЕЛЕКТИВНОЕ
ТРАВЛЕНИЕ



1. экспонирование (окис-
ление)



2. селективное травление
HCl + Al



3. результат — элемент
пленки

ДП — донорная подложка, АП — акцепторная подложка, МП — металлическая (или полупроводниковая) пленка (поверхность)

ЛАЗЕРНЫЙ НАГРЕВ ТОНКИХ ПЛЕНОК МОЖЕТ ВЫЗВАТЬ СЛЕДУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ :

–ТЕРМОЭЛЕКТРОННУЮ И ТЕРМОИОННУЮ ЭММИСИЮ;

–ДЕСОРБЦИЮ ГАЗА С ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНКИ;

–ГЕТЕРОГЕННЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ,
НАПРИМЕР,ОКИСЛЕНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ И Т.Д.;
ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО
ВЕЩЕСТВА ИЛИ АТОМОВ ПЛЕНКИ С ПОДЛОЖКОЙ;

–ТЕРМО- или ФОТОДИССОЦИАЦИЮ НЕКОТОРЫХ
СОСТАВЛЯЮЩИХ;

–СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В МАТЕРИАЛЕ
(РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЮ);

–ОТЖИГ ДЕФЕКТОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ
СТРУКТУРЕ; ВЗАИМНУЮ ДИФФУЗИЮ НАГРЕТЫХ СЛОЕВ;

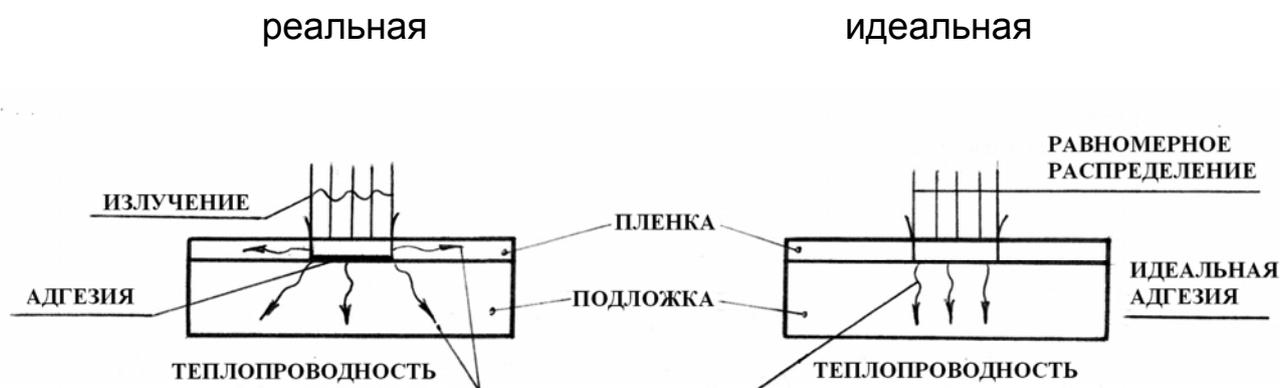
–ТЕРМИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ И ПОЯВЛЕНИЕ
ДЕФОРМАЦИЙ;

–СПЕКАНИЕ И УСАДКУ МИКРОПОРИСТЫХ СЛОЕВ.

СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВАНИЯ:

ЧРЕЗВЫЧАЙНО ВЫСОКИЕ
СКОРОСТИ НАГРЕВА (ДО 10^{11} К/с) и более,
СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ (ДО 10^8 К/с) и более, и
ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ГРАДИЕНТЫ (ДО 10^6 К/с) и более.

СХЕМЫ ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА



Основные факторы лазерного нагрева:

- теплоотвод в подложку,
- боковой отвод тепла в пленку,
- адгезия пленки к подложке,
- неоднородный нагрев пленки по толщине,
- неоднородное поперечное распределение интенсивности светового пучка,
- температурная зависимость поглощательной способности,
- временные флуктуации плотности светового потока,
- охлаждение пленки.

Далее представлены используемые на практике формулы для типичных режимов нагрева при различных параметрах пленки и подложки

**Наиболее употребительные
ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВАНИЯ ПРИ
РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ ПЛЕНКИ И ПОДЛОЖКИ**

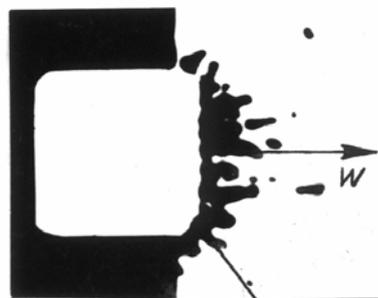
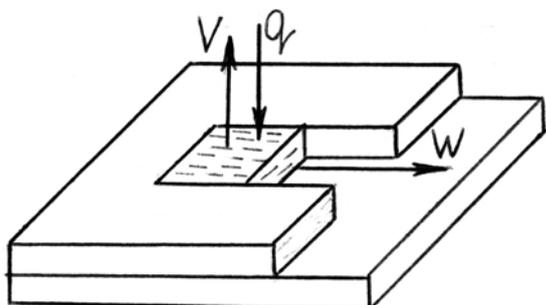
Температуры для:	Адиабатические режимы, $\tau < 100$ нс	Режимы теплопроводности, $\tau > 100$ мкс
Непрозрачная пленка и любая подложка	$T = \frac{q_0 A_1 t}{\rho_1 c_1 h} \quad (1)$	$T = \frac{2q_0 A_1 \sqrt{a_2 t}}{\sqrt{\pi k_2}} \quad (2)$
Полупрозрачная пленка и непрозрачная подложка	$T = \frac{q_0 (A_1 + D_1) t}{\rho_1 c_1 h} \quad (3)$	$T = \frac{2q_0 (A_1 + D_1) \sqrt{a_2 t}}{\sqrt{\pi k_2}} \quad (4)$
Полупрозрачная пленка и слабо поглощающая подложка	$T = \frac{q_0 t}{\rho_1 c_1 h} \left(A_1 + \frac{4D_1 \alpha_2 \sqrt{a_2 t}}{3\sqrt{\pi}} \right) \quad (5)$	$T = 2q_0 A_1 \sqrt{a_2 t} + \frac{q_0 D_1 t \alpha_2}{\rho_2 c_2} \quad (6)$
Прозрачная пленка и непрозрачная подложка	$T = \frac{q_0 D_1 t}{\rho_1 c_1 h} \quad (7)$	$T = \frac{2q_0 D_1 \sqrt{a_2 t}}{\sqrt{\pi k_2}} \quad (8)$
Прозрачная пленка и слабо поглощающая подложка	$T = \frac{3}{4\sqrt{\pi}} \frac{q_0 D_1 t \alpha_2 \sqrt{a_2 t}}{\rho_1 c_1 h} \quad (9)$	$T = \frac{q_0 D_1 t \alpha_2}{\rho_2 c_2} \quad (10)$

T — температура пленки, t — длительность импульса, q_0 — плотность потока, A и D — коэф. поглощения и пропускания пленки, a — температуропроводность, k — теплопроводность, c — теплоемкость, ρ — плотность, h — толщина пленки, α — линейный коэффициент поглощения (1 — для пленки, 2 — для подложки).

Пример:

1. Рассчитайте, возможно ли достичь температуры рекристаллизации пленки Cr ($T_p=800\text{K}$) на стеклянной подложке ($a_2=6 \cdot 10^{-3}$ см/с, $k_2=10^{-2}$ Вт/см²·К) при облучении лазером YAG:Nd ($\lambda=1,06\text{мкм}$, $A_1=0.5$) $\tau=1\text{мс}$, $q_0=6 \cdot 10^3$ Вт/см²
По формуле 2 $T=1000 \text{ K} > T_p$
2. Рассчитайте порог испарения пленки Cr ($h=100 \text{ нм}$) на стеклянной подложке при облучении лазером YAG:Nd для $\tau=10^{-3}$ с и $\tau=10^{-7}$ с.
По формуле 2 для $\tau=10^{-3}$ получаем $q_0=1.5 \cdot 10^4$ Вт/см², для $\tau=10^{-7}$ с $q_0=0,5 \cdot 10^7$ Вт/см²

МЕХАНИЗМ УДАЛЕНИЯ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



Если скорость испарения – V_u , а W - скорость движения потока расплава – W , то уменьшение толщины h тонкой пленки можно выразить следующим образом:

$$-\frac{dh}{dt} = V_u + W \frac{h_0 - h}{G} \quad (1)$$

$$G = \Pi/S$$

где Π — периметр, S — площадь зоны расплава (для квадрата $G = 1$, для окружности $r/2$)

Из формулы (1):

$$h = \left(h_0 + \frac{V_u}{W} G \right) \left[1 - \exp \frac{Wt}{G} \right] \quad (2)$$

$$\frac{M_l}{M_v} = \frac{\Delta}{\ln(1 + \Delta)} - 1 \quad (3),$$

где $\Delta = \frac{h_0 W}{G V_u}$ (4), параметр, определяющий относительный вклад испарения в поток расплава.

Обычно $\frac{W}{V_u} \approx \frac{100 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1000 \frac{\text{м}}{\text{с}}} \approx \frac{1}{10}$ и для $\frac{h_0}{G} < \frac{1}{10}$ (большие отверстия ~ 100

мкм), при этом по формуле (1): $h = h_0 - V_u t$ (5) — модель испарения, из теории (1-5) можно оценить пороги удаления для любых режимов и размеры получаемых при этом отверстий.

СХЕМА ДВУХФАЗНОГО ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ СВЕТОВОГО ПОТОКА

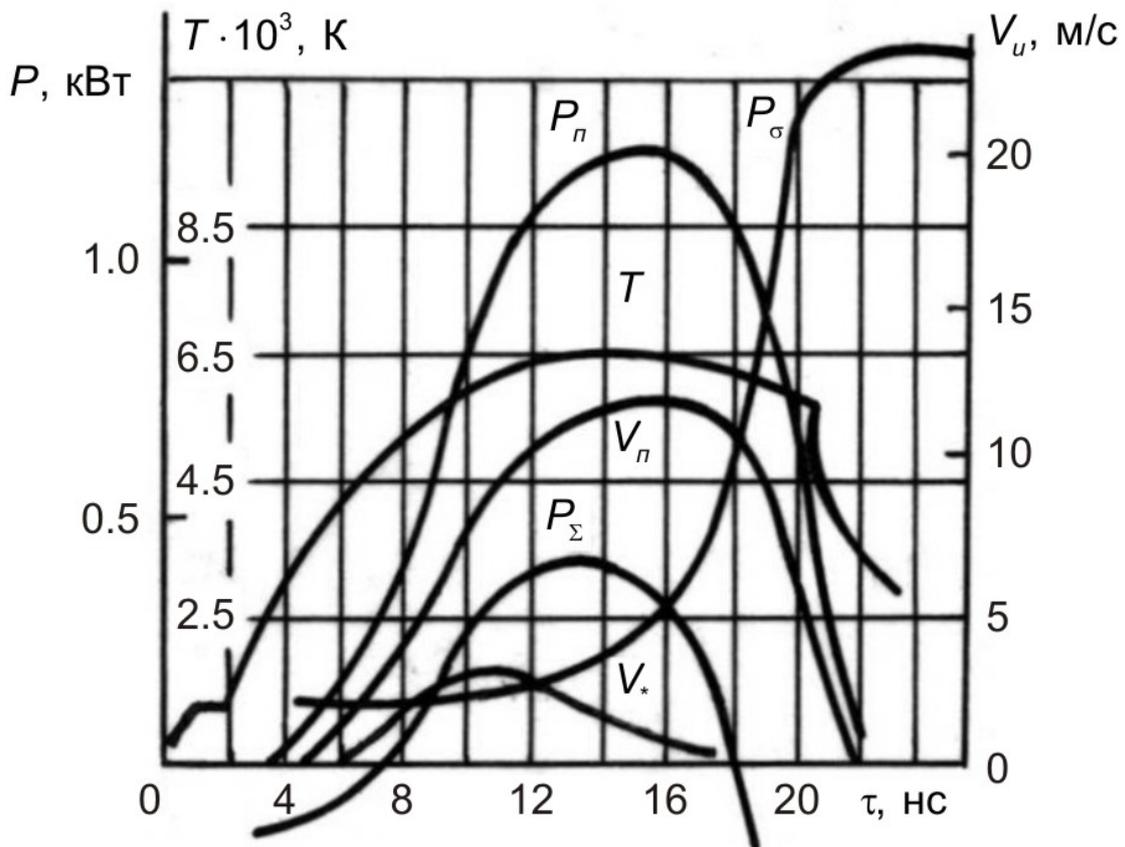
$$q \approx 10^8 \text{ Вт/см}^2, t \approx 10^{-8} \text{ с}$$

1. Плавление при $t \sim 10^{-10}$ с)

2. Испарение из жидкой фазы, появление реактивного давления паров (давления отдачи) P

3. Испарение с поверхности жидкой фазы и вытеснение расплава из зоны облучения

4. После уменьшения T , V_u и P_u движение расплава под действием сил поверхностного натяжения

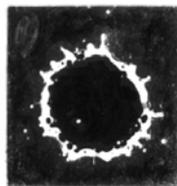


Зависимости основных параметров процесса двухфазного удаления во времени для пленки серебра толщиной $h_0=200$ нм на кварцевой подложке при $q \approx 10^8 \text{ Вт/см}^2$, $l = 20$ мкм

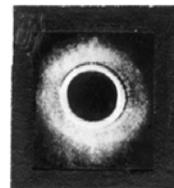
МЕХАНИЗМ УДАЛЕНИЯ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



1



2



3

- 1) Модель испарения
 - 2) Модель плавления пленки и движения расплава под действием сил поверхностного натяжения
 - 3) Модель испарения пленки в центре отверстия и истечения расплава на периферии
- 1) не учитывает жидкой фазы, 2, 3) не учитывает появления большого количества расплава в форме капель и осаждения продуктов разрушения вне зоны облучения (эффект распыления)



а

б

в

6 мм

Электронные микрофотографии облученной зоны (ОЗ) пленки (100 нм Cr) на стеклянной подложке (лазер на азоте, контурно-проекционный метод):

- а) $q = 5$ — жидкая фаза (ЖФ) разбрасывается за пределы ОЗ (наличие ЖФ на стороне АВ по причине удаления материала из соседней зоны),
- б) $q = 2$ — ЖФ перемещается к краям ОЗ,
- в) $q = q$ — “чистое” испарение, многоимпульсный режим.

Двухфазная модель дает возможность объяснить все особенности механизма удаления пленки

МЕХАНИЗМЫ УДАЛЕНИЯ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

При рассмотрении механизма удаления тонких пленок лазерным излучением следует учитывать движение расплава под действием давления отдачи и поверхностного натяжения во время испарения.

Основные механизмы удаления пленки, зависящие от значений параметров Δ , l , h , q , а также от термофизических свойств пленки и подложки:

1. ИСПАРЕНИЕ – для $\Delta \ll 1$ (что соответствует размеру зоны воздействия $l = 100$ мкм, толщине пленки $h \geq 100$ нм, плотности мощности $q \leq (2-3)q^{\text{пор}}$, $q^{\text{пор}}$ – порог разрушения пленки)

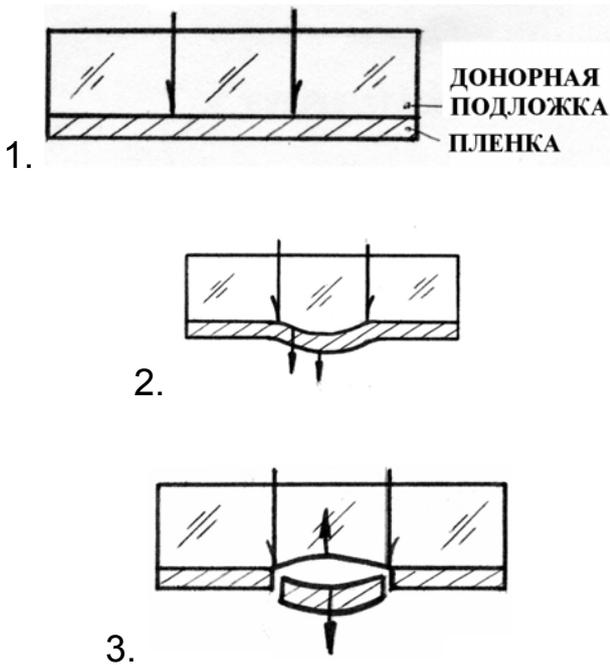
2. ИСПАРЕНИЕ С УДАЛЕНИЕМ РАСПЛАВА ИЗ ЗОНЫ ОБЛУЧЕНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ДАВЛЕНИЯ ОТДАЧИ – для l (что соответствует $l = 10$ мкм, $h = 100$ нм $q \leq (2-3)q^{\text{пор}}$)

3. ПЛАВЛЕНИЕ С УДАЛЕНИЕМ РАСПЛАВА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ – Для $\Delta \gg 1$ и $q \geq q^{\text{пор}}$, что соответствует $l = 1$ мкм, $h = 30$ нм

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСПАРЕНИЮ «ДОПОРОГОВЫЕ» МЕХАНИЗМЫ ЛОКАЛЬНОГО УДАЛЕНИЯ ПЛЕНОК ПРИ ЛАЗЕРНОМ ПЕРЕНОСЕ

)

I. термомеханический механизм отрыва пленки



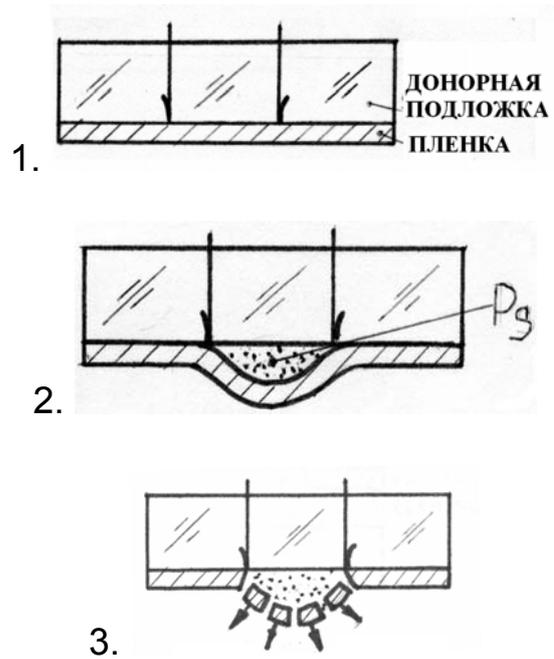
$$F_{пор} = F_{п.пр.} + F_{п.расш.} + F_{разр}$$

$F_{п.пр.}$ — описывает модель поперечного прогиба поверхности пленки под действием продольного теплового расширения,

$F_{п.расш.}$ — описывает модель поперечного расширения пленки,

$F_{разр}$ — описывает модель отрыва пленки из-за изменения движения подложки в поперечном направлении под действием теплового расширения и упругих сил

II. механизм отрыва пленки под действием избыточного давления паров $p_{изб}$



$$P_{изб} = 0.5P_{нас} + P_{д} + P_{э}$$

$P_{нас}$ — давление насыщенного пара при T (значительно для поверхности с дефектами),

$P_{д}$ — давление десорбированных молекул газа (значительно для загрязненных поверхностей),

$P_{э}$ — давление газификации (парообразования, разложения) материала подложки или подслоя (пластмассы и т.п.).

МЕХАНИЗМЫ ЛОКАЛЬНОГО ОСАЖДЕНИЯ ПЛЕНКИ

ОПТИМАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ ИСПАРЕНИЯ- АБЛЯЦИИ ЛАЗЕРНОГО ПЕРЕНОСА (ЛП)

ОСНОВНЫЕ СТАДИИ МОДЕЛИ ИСПАРЕНИЯ-АБЛЯЦИИ

–
нагрев до плавления

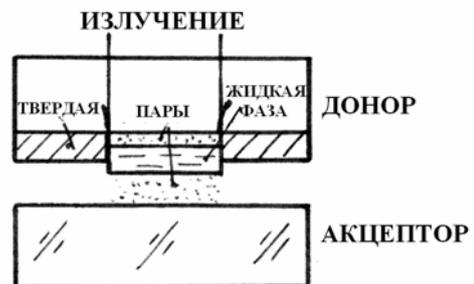
– плавление

– испарение

– отрыв пленки и перенос ее от до-
нора к акцептору

– гидродинамический разлет жид-
кой фазы на акцепторную подложку

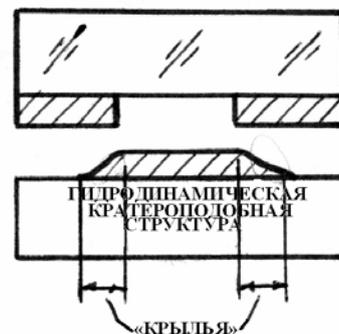
– рассеивание (разброс) паров из
облученной зоны



главные особенности:

– обратный поток паров
(процесс повторного испарения)

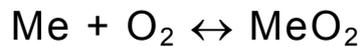
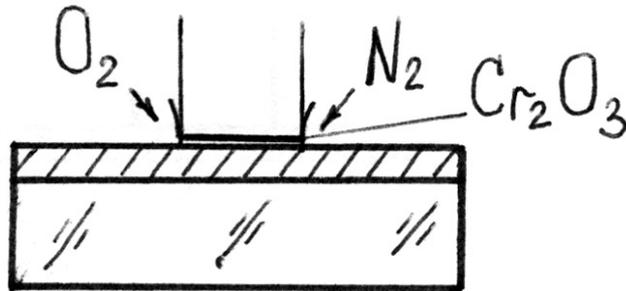
– образование «крыльев» осадка на
акцепторной подложке)



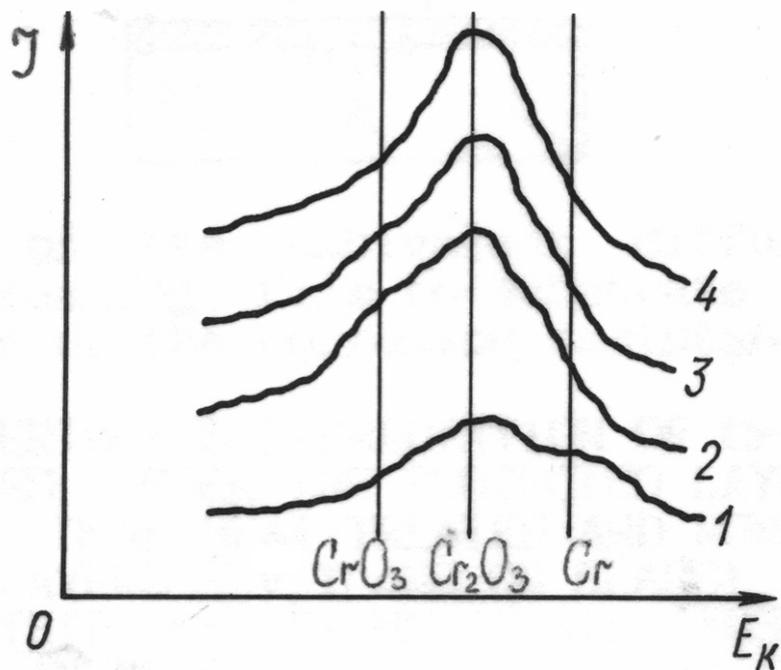
ОКИСЛЕНИЕ С СЕЛЕКТИВНЫМ ТРАВЛЕНИЕМ(1)

ДОВОДЫ В ПОЛЬЗУ СЕЛЕКТИВНОГО ТРАВЛЕНИЯ ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЛУЧОМ ЛАЗЕРА

1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ С АТМОСФЕРОЙ



Формирование окисной пленки под действием лазерного облучения, практически нерастворимой в HCl вносит основной вклад в наблюдаемую селективность травления

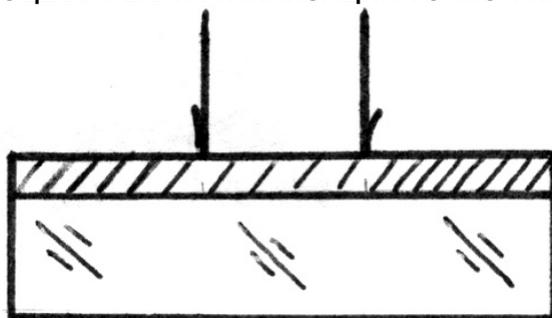


Рентгеновские спектры тонких пленок хрома (Cr), облученных в воздухе YAG: Nd лазером в режиме модуляции добротности.

ОКИСЛЕНИЕ С СЕЛЕКТИВНЫМ ТРАВЛЕНИЕМ(2)

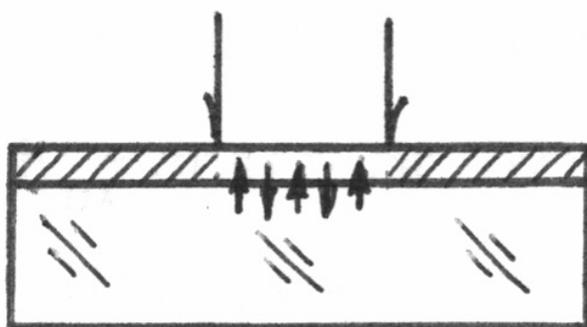
иные доводы в пользу селективного травления
после облучения лучом лазера

2. ПРОЦЕСС РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ



Лазерное облучение пленок Cr приводит к структурным изменениям (включающим в себя уменьшение размеров шероховатостей и граничных областей), которые должны увеличить время травления и уменьшить сопротивление.

3. ВЗАИМНАЯ ДИФфуЗИЯ МАТЕРИАЛОВ ПЛЕНКИ И ПОДЛОЖКИ

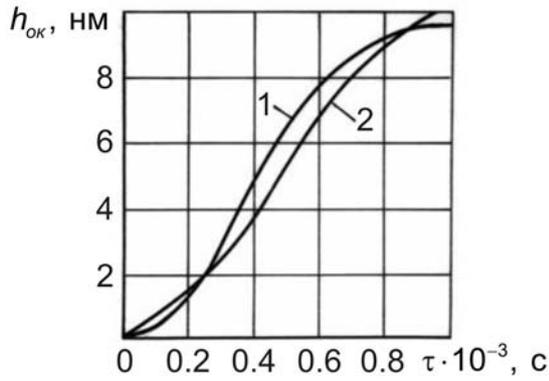


Результатом взаимной диффузии материалов пленки и подложки являются растущая адгезия пленки-подложки и возможное увеличение коррозионной стойкости.

Специальные эксперименты (облучение пленок хрома в инертных газах; с защитным слоем SiO_2 и без него; после глубокой тепловой обработки и без нее; нанесенного на специальные промежуточные слои из V, Ti и на стекло) показали,

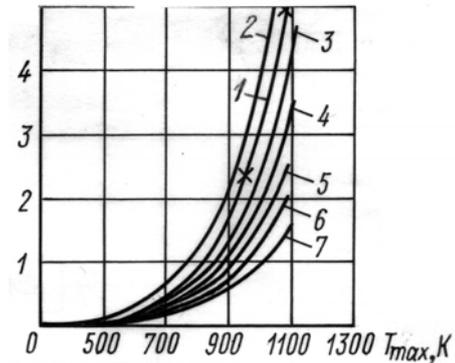
что лазерное облучение тонкой пленки хрома (Cr) в воздухе приводит к образованию очень тонкого слоя окиси (Cr_2O_3), повторяющего форму оптического изображения и обладающего значительной селективностью травления, сравнимой с первоначальной пленкой Cr, то есть выявили эффект маскирования.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОКИСЛЕНИЯ



Кинетика роста тонкой окисной пленки в течении лазерного импульса:

1 — эксперимент, 2 — теория



Толщина тонкой окисной пленки как функция максимальной температуры нагрева

1 — эксперимент (3), 2–7 — теория (1; 2) для длительности импульса 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} , 10^{-8}

$$h_{\text{ок теор}}^2 = 4h_{\text{ок}}^* U(T) t_{\text{экв}} \quad (1)$$

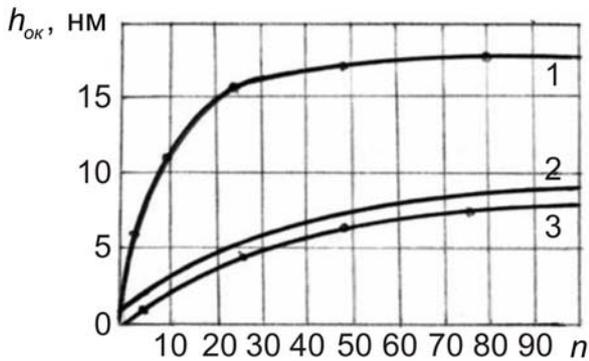
$h_{\text{ок}}^*$ — постоянная в теории Кабрера–Мотта

$$U(T) = U_0 \exp\left(-\frac{T_0}{T}\right) \quad (2)$$

$t_{\text{экв}} = k_{\text{ок}} \tau$, $k_{\text{ок}}$ — коэффициент неизотермического окисления,
 T_0 — температура активации диффузии

$$k_{\text{ок}} = \frac{2T_{\text{max}}^2}{T_0(T_{\text{max}} - T_0)}, \text{ если } \frac{T_{\text{max}}}{T_0} \approx \frac{1}{20}, \frac{T_0}{T_{\text{max}}} \approx \frac{1}{5}, k_{\text{ок}} \approx 0.125$$

(T_0 это начальная T).



Изменение толщины тонкой окисной пленки при многоимпульсном окислении:

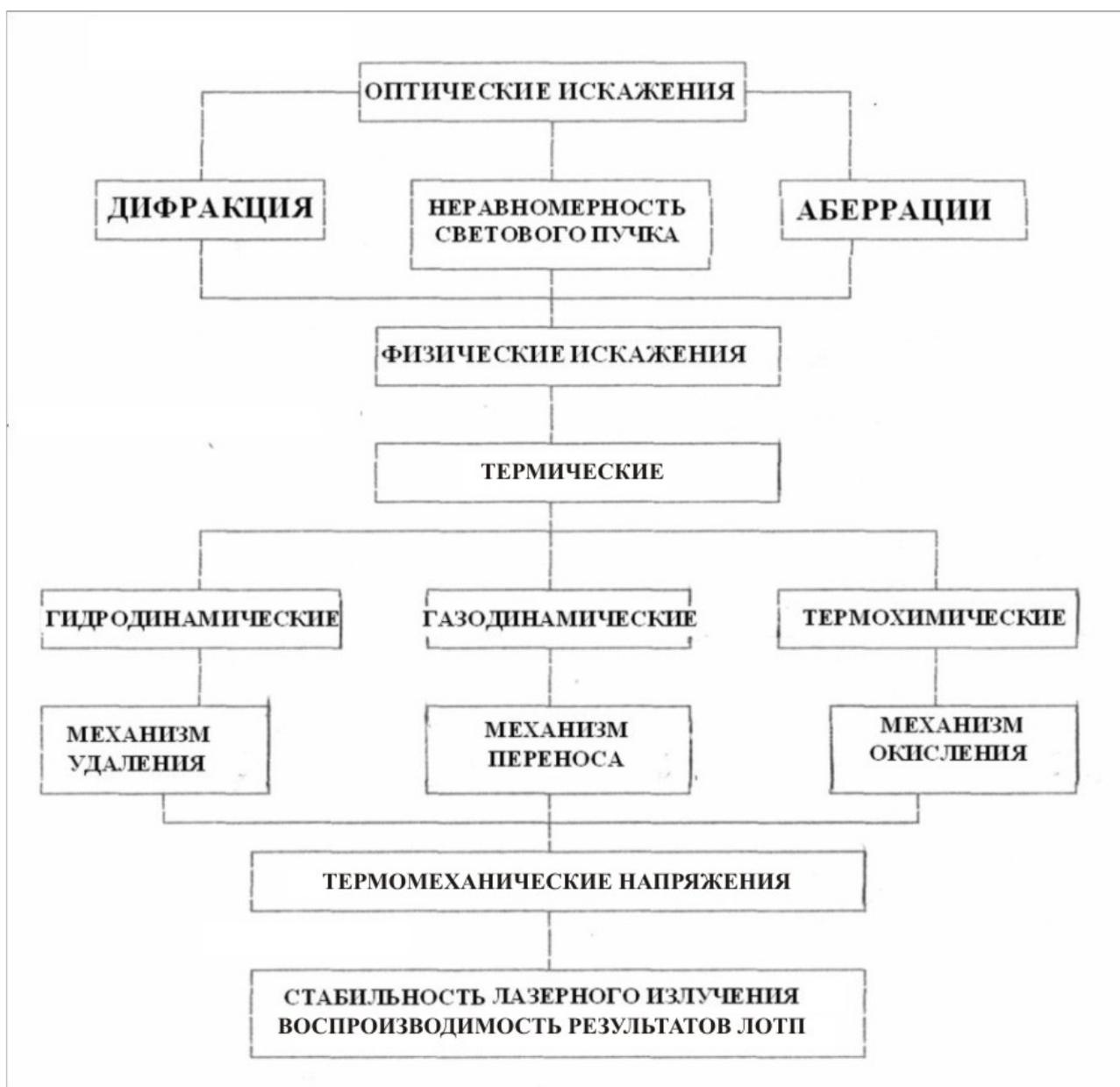
1 — эксперимент ($\tau = 10^{-3}$ с), 2 — эксперимент ($\tau = 10^{-7}$ с), 3 — теория ($\tau = 10^{-7}$ с)

Вывод: возможно получить слои окисла металлических пленок: Cr, Cr:SiO, Fe–Ni–Co, Ti, V, толщиной ~ 10 нм с достаточной устойчивостью к химическому воздействию.

2.3. ТОЧНОСТЬ И КАЧЕСТВО ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК

ЗАДАЧА N1:
СОЗДАТЬ ОПТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ХОРОШЕГО КАЧЕСТВА

ЗАДАЧА N2:
ПЕРЕНести ЕГО НА МИКРОЭЛЕКТРОННУЮ СТРУКТУРУ
(например, в системе пленка-подложка)

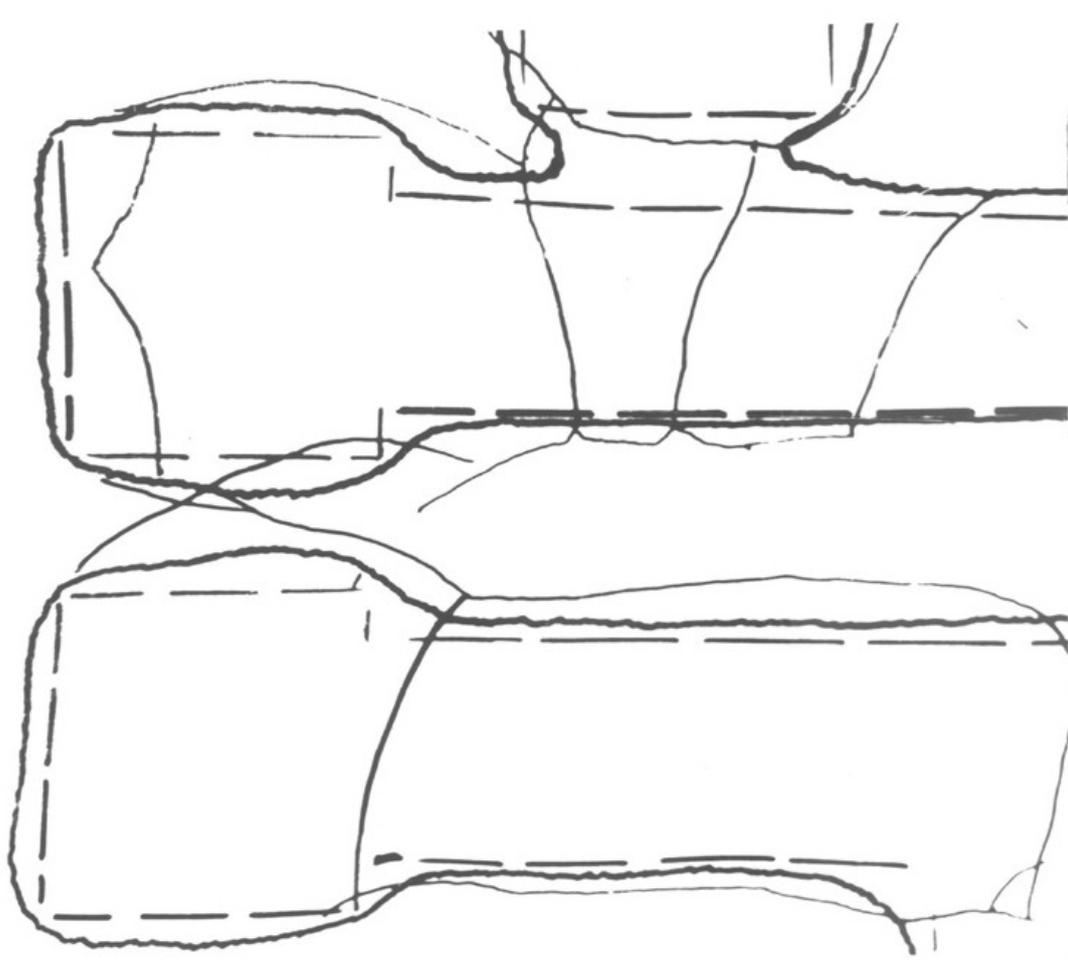


2.3.1. ТЕРМИЧЕСКИЕ ИСКАЖЕНИЯ ТОПОЛОГИИ РИСУНКОВ НА ПЛЕНКАХ

Точность и качество лазерной обработки тонких пленок напрямую связаны с величиной и характером термических искажений образца в результате оттока тепла из облученной зоны и, в дальнейшем, испарения и плавления материала вне этой зоны.

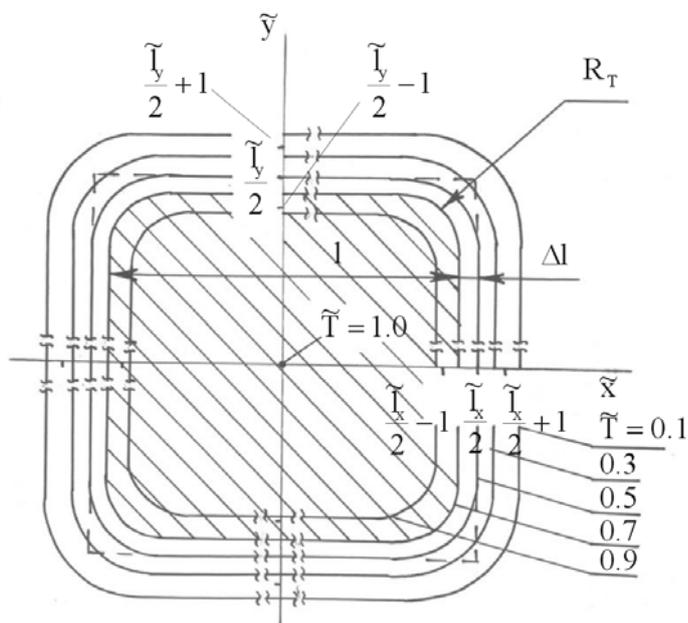
Термические искажения приводят к:

- сглаживанию углов рисунка,
- выплавлению тонких перемычек между соседними элементами ,
- появлению переходных зон на краях рисунка и к другим дефектам от изменения размера (см. рис.) вплоть до до появления трещин в подложке.

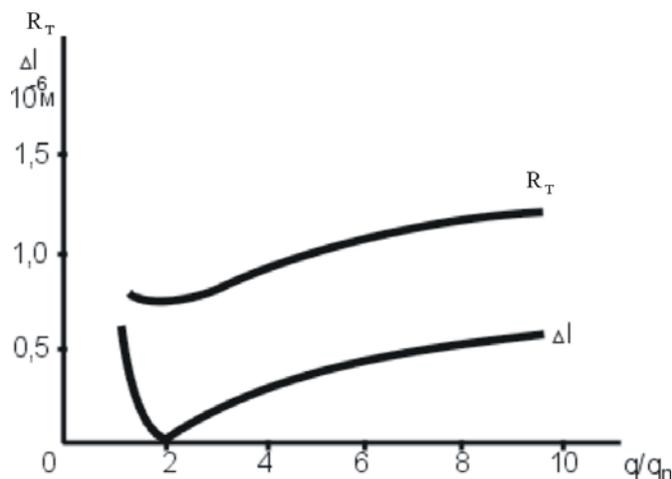


Образец тонкой пленки Cr ($h = 100$ нм) на подложке из стеклокерамики. Метод: лазерное испарение в режиме свободной генерации ($\tau = 1$ мс, $q = 10$ Дж/см²).

ТЕРМИЧЕСКИЕ ИСКАЖЕНИЯ РАЗМЕРА И ФОРМЫ



Изотермы нагрева пленки Or
($h = 100$ нм, $\tau = 10$ нс), зона
облучения прямоугольной
формы 5×50 мкм

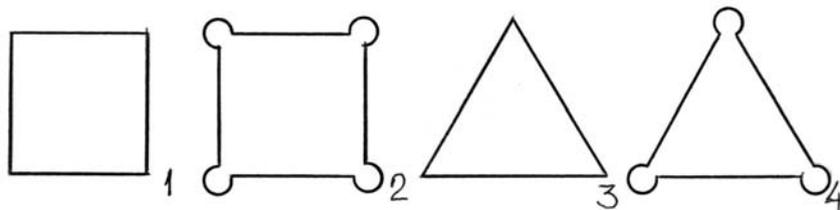


Искажения формы (1) и разме-
ра (2) прямоугольного элемен-
та, зависящие от нормирован-
ной плотности мощности.

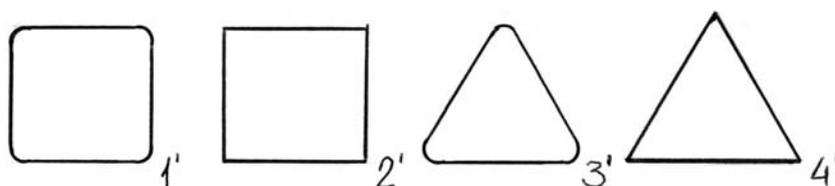
$q: T(q = q_{кр}, x = 0, y = 0) = T_{пор}$
 T_{th} – пороговая температура

$$R_{min} = 1.7 \sqrt{a_1 \tau}$$

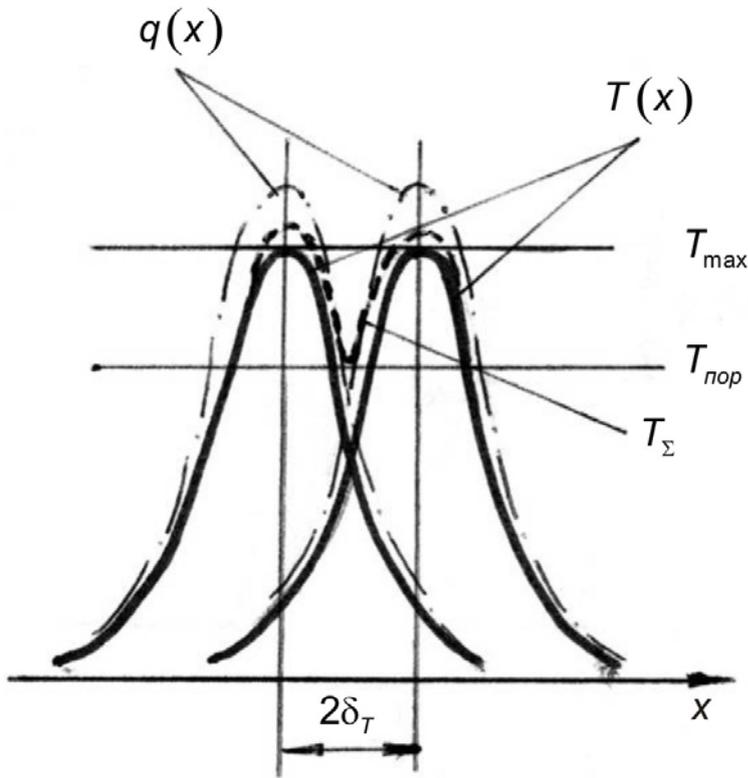
**Форма
облученных зон**



**Форма
соответствующих
«термических»
изображений**

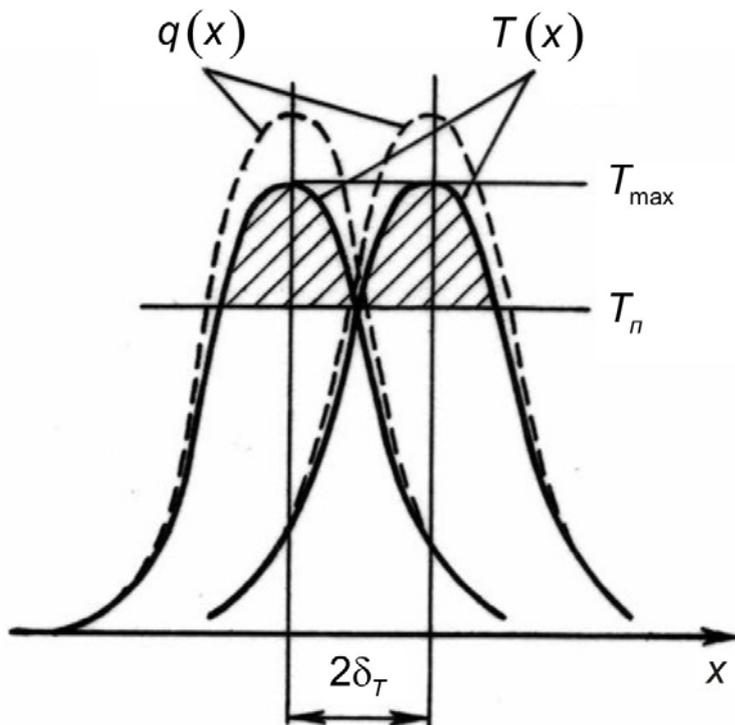


РАЗРЕШЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ



Для
одновременного
облучения

$$\delta_T = x_0 \sqrt{\ln(2T_{\max}/T_{\text{пор}})}$$

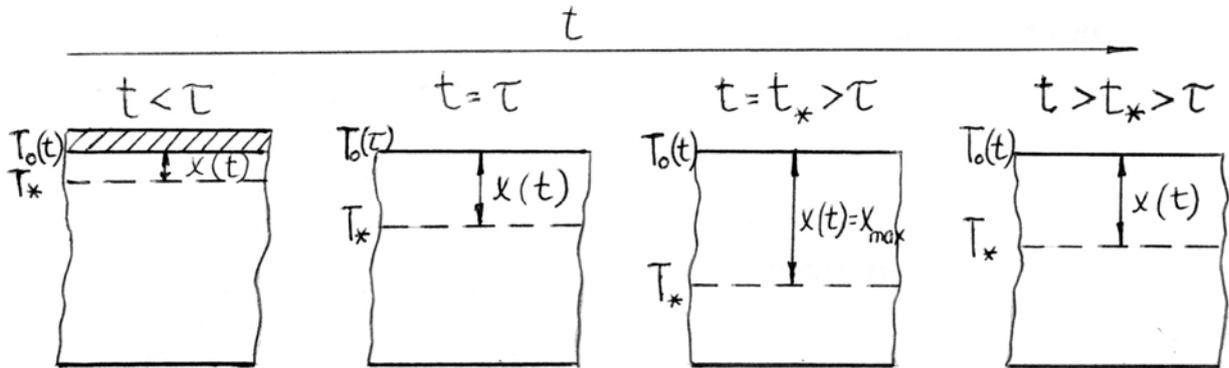


Для
последовательного облу-
чения

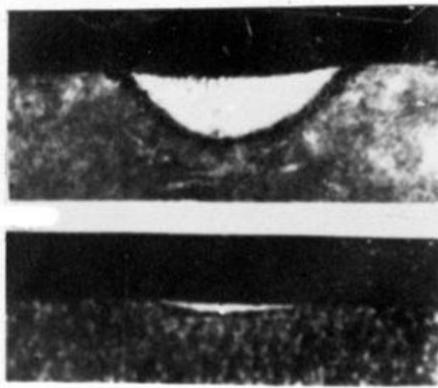
$$\delta_T = x_0 \sqrt{\ln(T_{\max}/T_{\text{пор}})}$$

x_0 — параметр Гауссова распределения
интенсивности $q(x)$

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ И ТЕПЛОТОВОДА В ПОДЛОЖКУ



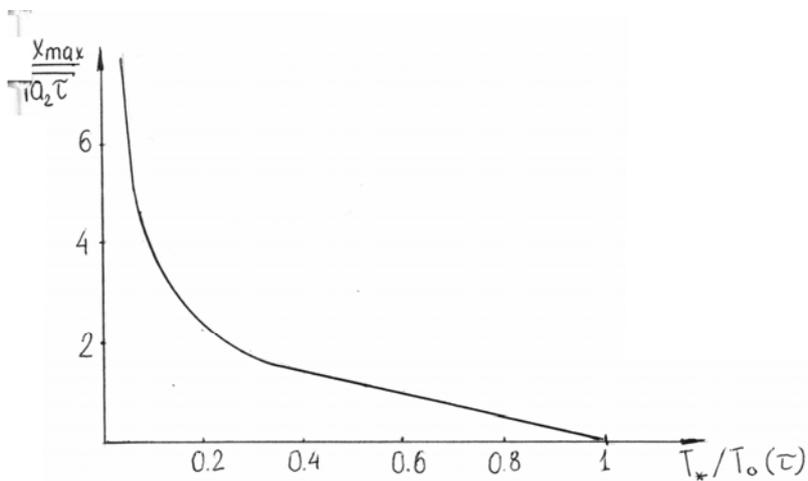
100 мкм



$\tau = 10^{-4}$ с

$\tau = 10^{-7}$ с

Зоны
термического воз-
действия –
закалка
стали

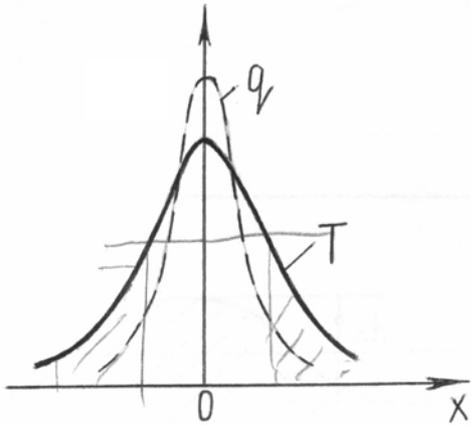


Для $\frac{T_*}{T_0(\tau)} < 0.3$

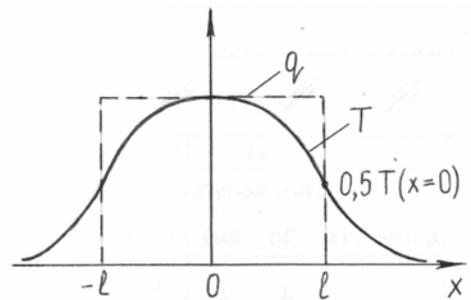
$$x_{\max} = \frac{\sqrt{a_2 \tau}}{\frac{T_*}{T_0(\tau) \sqrt{2e}}}$$

КОНТРАСТ ГРАНИЦЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

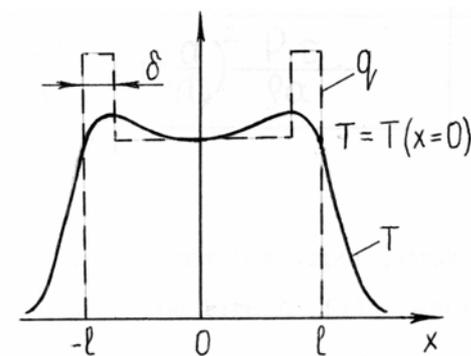
Распределение



Гауссово



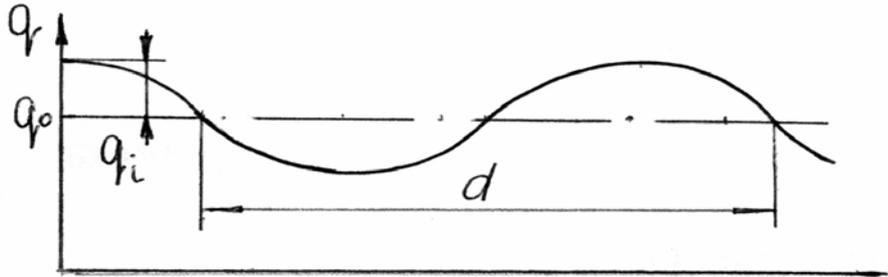
Равномерное



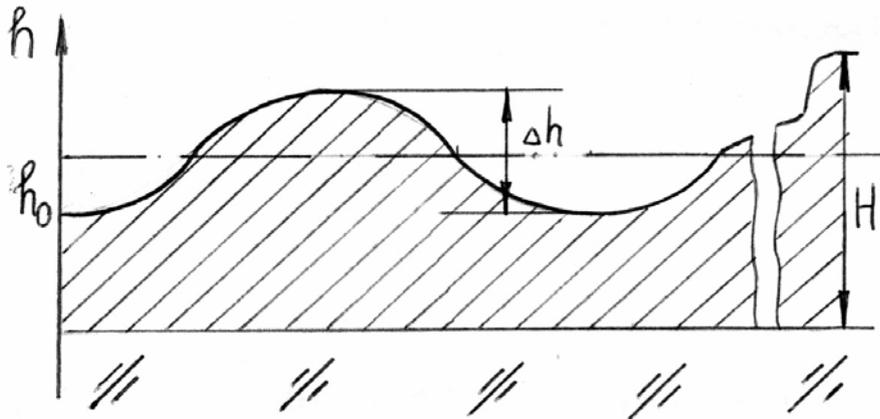
Оптимальное

$$\frac{\partial T^{\text{опт}}(x=l)}{\partial x} \approx 2 \frac{\partial T^{\text{равном}}(x=l)}{\partial x}$$

НЕРЕГУЛЯРНОСТЬ ФРОНТА ИСПАРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНКИ



$$q = q_0 + q_u \cos\left(2\pi \frac{x}{d}\right) \varepsilon = \frac{q_i}{q_0}$$



$$T = T_0 + T_u \cos 2\pi \frac{x}{d}$$

$$d_* = 2\pi \sqrt{a\tau} \sim 3$$

$d < d_*$	$d > d_*$
гидродинамический	испарительный
Механизм образования нерегулярности поверхности	
$T_\tau(t) \sim t$	$T_\tau(t) = \text{const}$
$\frac{\Delta h}{h} = 2 \left(\varepsilon \frac{d}{d_*} \right)^2 \frac{P\tau}{\rho a}$	$\frac{\Delta h}{h} = \frac{2\varepsilon}{1-\varepsilon^2} \frac{t_{\text{нп}}}{\tau - t_{\text{нп}}}$

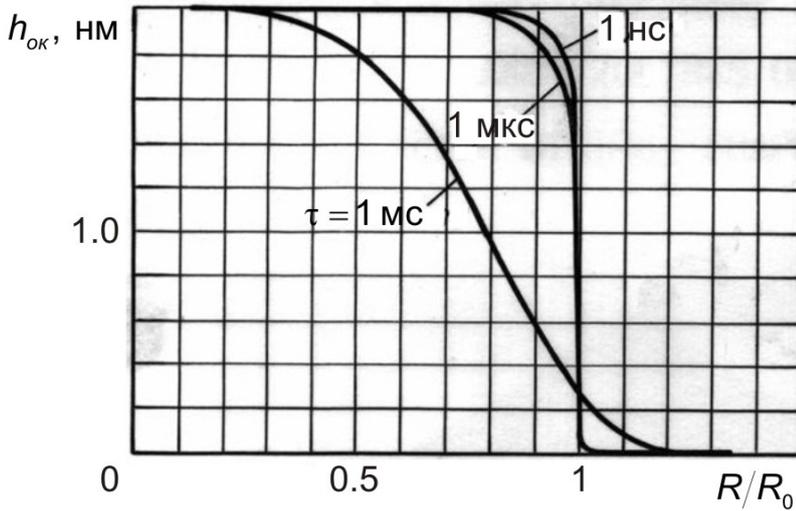
P – максимальное давление паров,
 $t_{\text{нп}}$ – время нагрева пленки до появления искажений.

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ТЕРМИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ

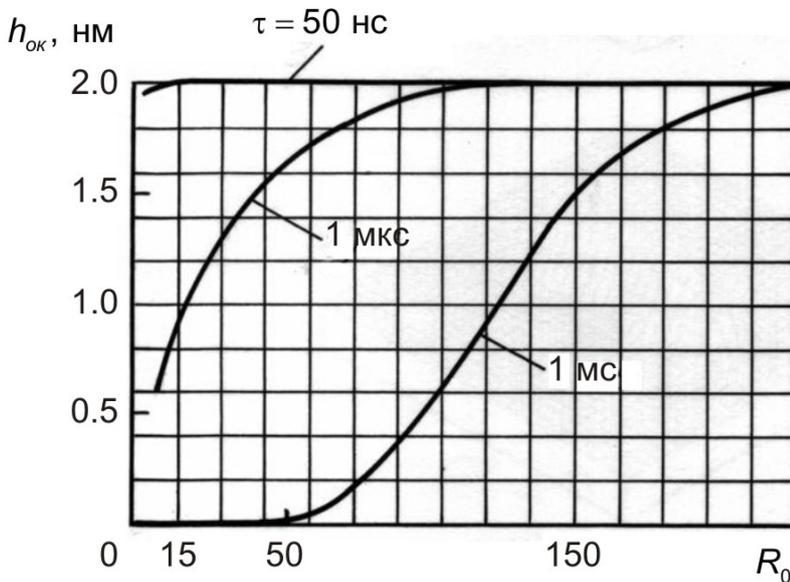
Поле зрения	Проявление	Причина	Значение (м) при $\tau = 10^{-8}$ с	Способы снижения
	Искажение формы элементов (скругление углов)	Неравномерность распределения температуры	$\sim \sqrt{a\tau} \approx 10^{-3} - 10^{-4}$	Уменьшение τ и a . Специально подобранное распределение интенсивности
	Искажение размера и формы перемычек между элементами	Неравномерность распределения температуры	$\sim \sqrt{a\tau} \approx 10^{-3} - 10^{-4}$	Уменьшение τ и a
	Неодинаковая проработка (контраст) больших и малых элементов	Зависимость порога разрушения от размеров	–	Уменьшение τ и a . Контурно–проекционный метод
	Наличие переходных зон меньшей толщины	Непрерывность распределения температуры	$\sim \sqrt{a\tau} \approx 10^{-3} - 10^{-4}$	Уменьшение τ и a

2.3.2. ТЕРМОХИМИЧЕСКИЕ ИСКАЖЕНИЯ ПЛЕНОЧНОЙ ТОПОЛОГИИ

Толщина окисного слоя



Толщина окисного слоя при радиусе пятна лазера 150 мкм



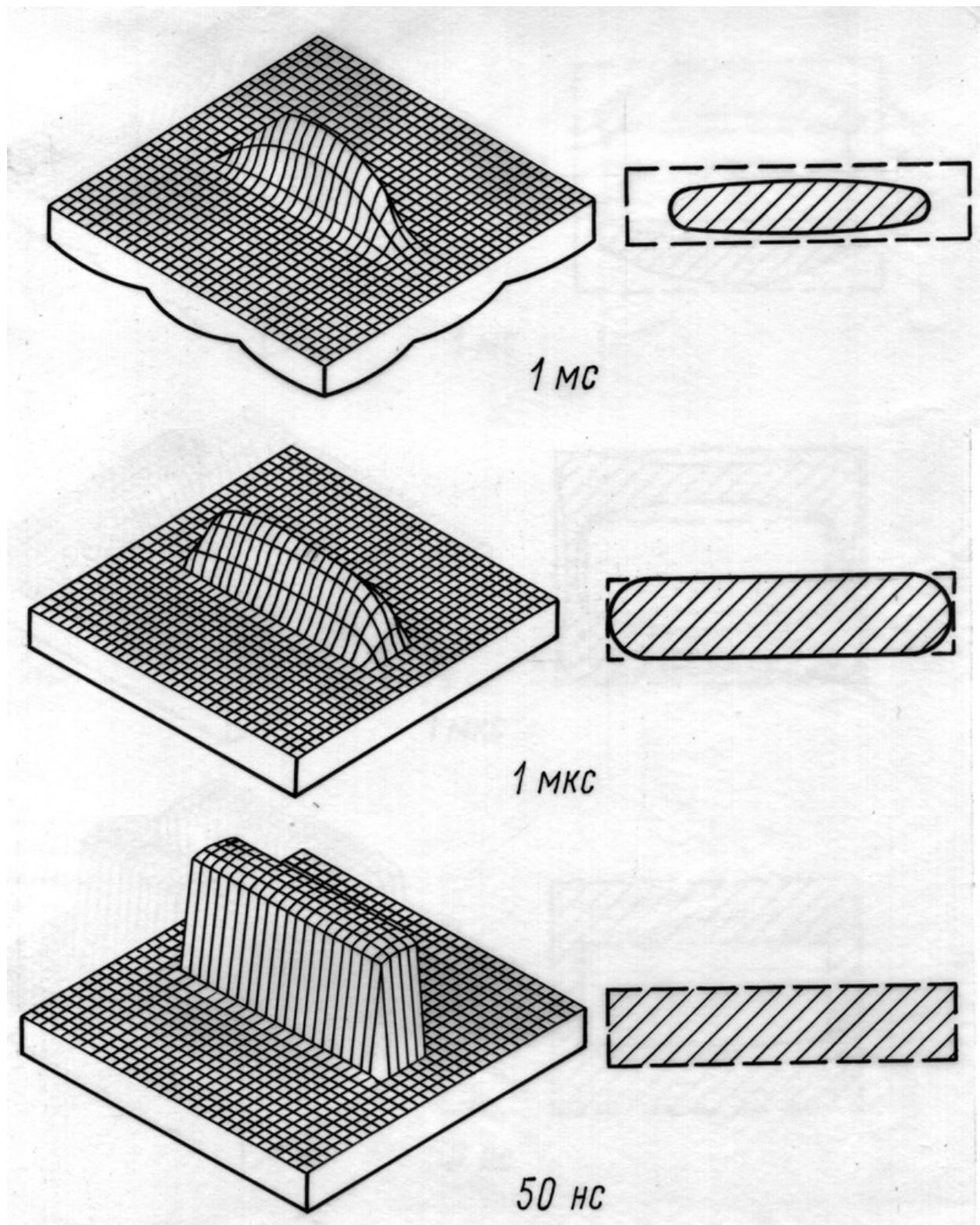
Толщина окисного слоя в центре изображения в зависимости от размера облученной зоны

Способы уменьшения термохимических искажений:

- снижение t и a
- специальное поперечное распределение интенсивности

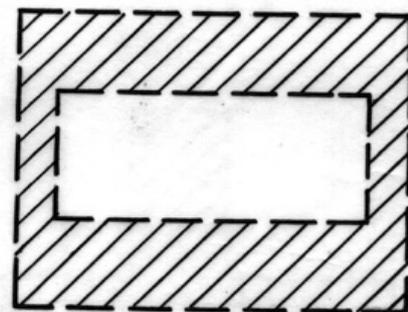
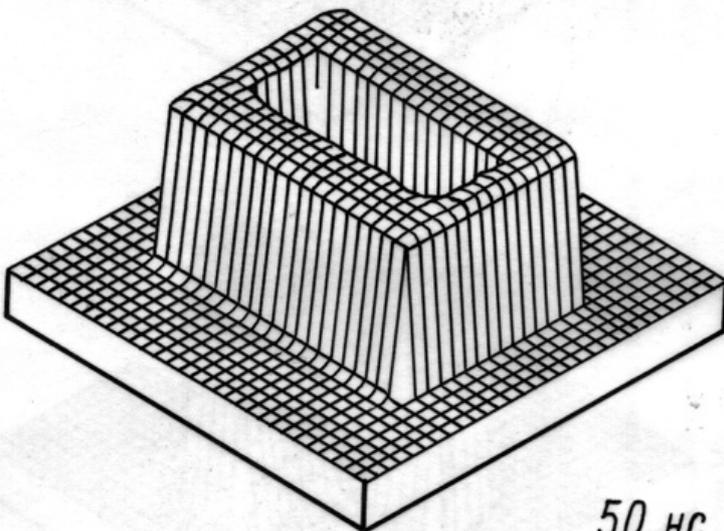
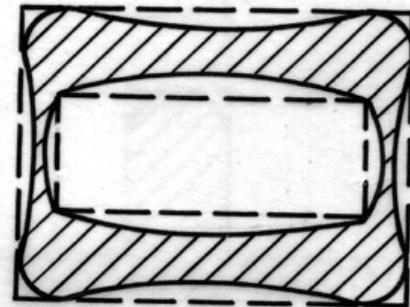
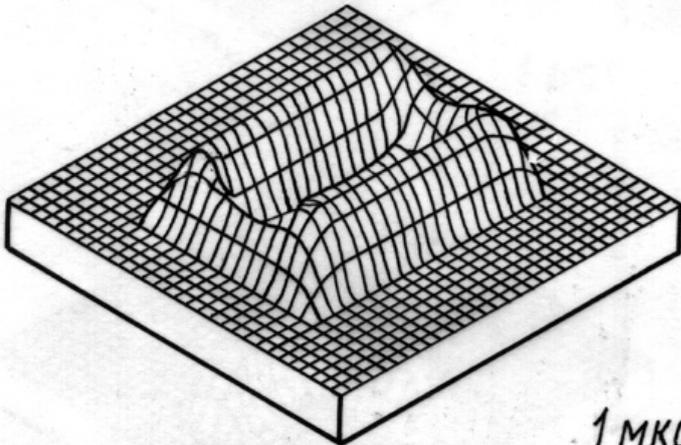
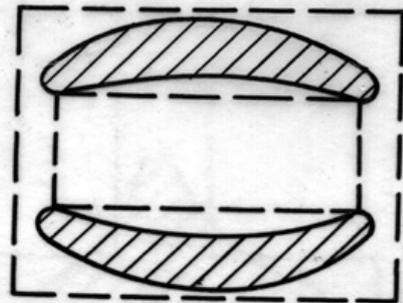
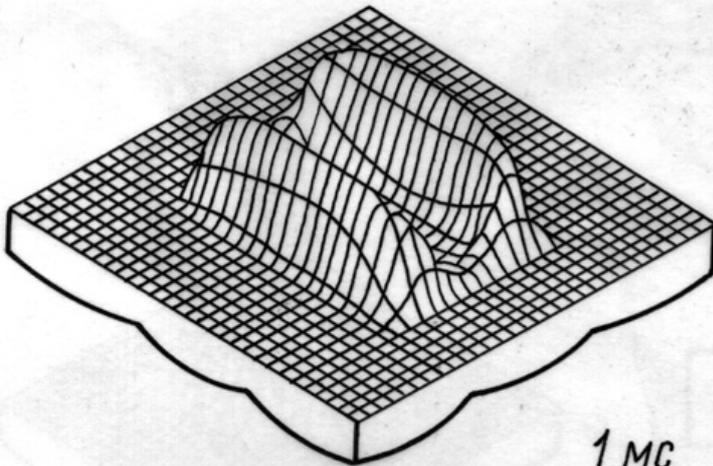
**ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОКИСНЫХ СЛОЕВ
ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ДЛИТЕЛЬНОСТЕЙ ИМПУЛЬСА (1)
И ИЗОЛИНИИ ОКИСНОГО СЛОЯ толщиной 1 нм**

(форма зоны облучения - полоса)



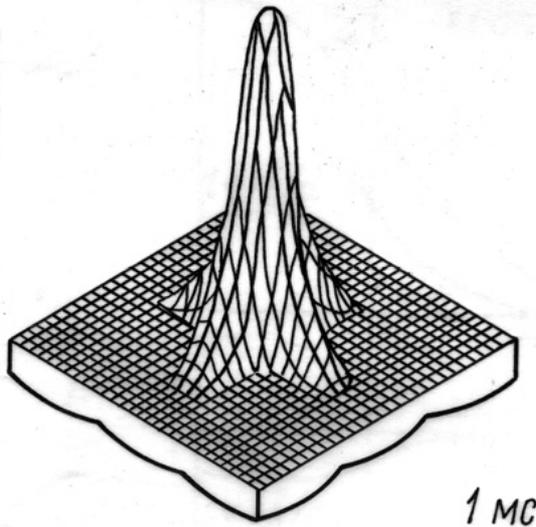
ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОКИСНЫХ СЛОЕВ (2)

(форма зоны облучения - прямоугольник)

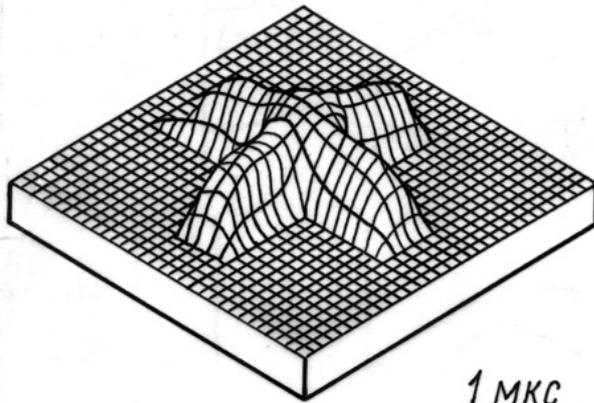
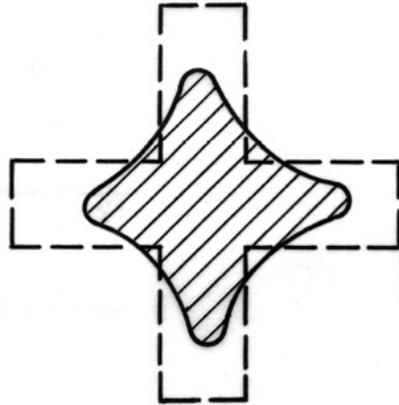


ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОКИСНЫХ СЛОЕВ (3)

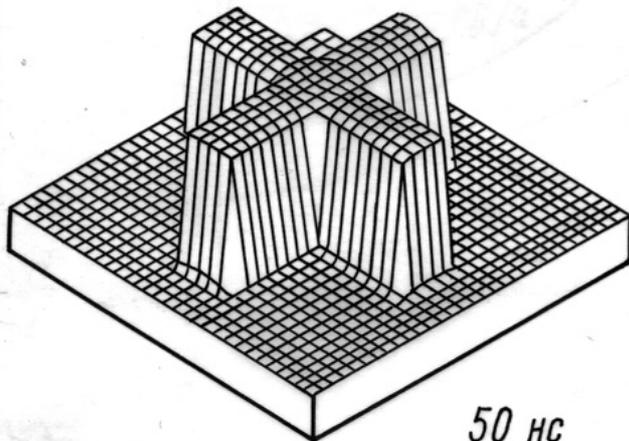
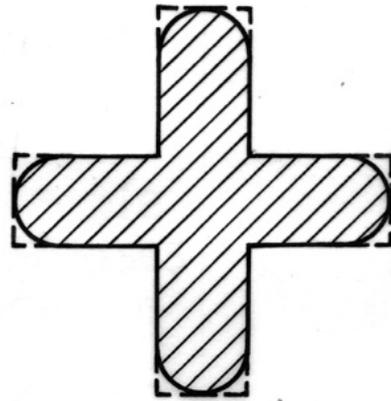
(форма зоны облучения – крест)



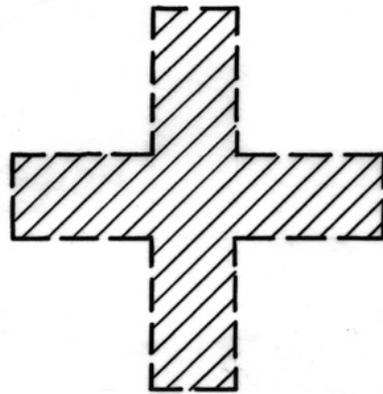
1 мс



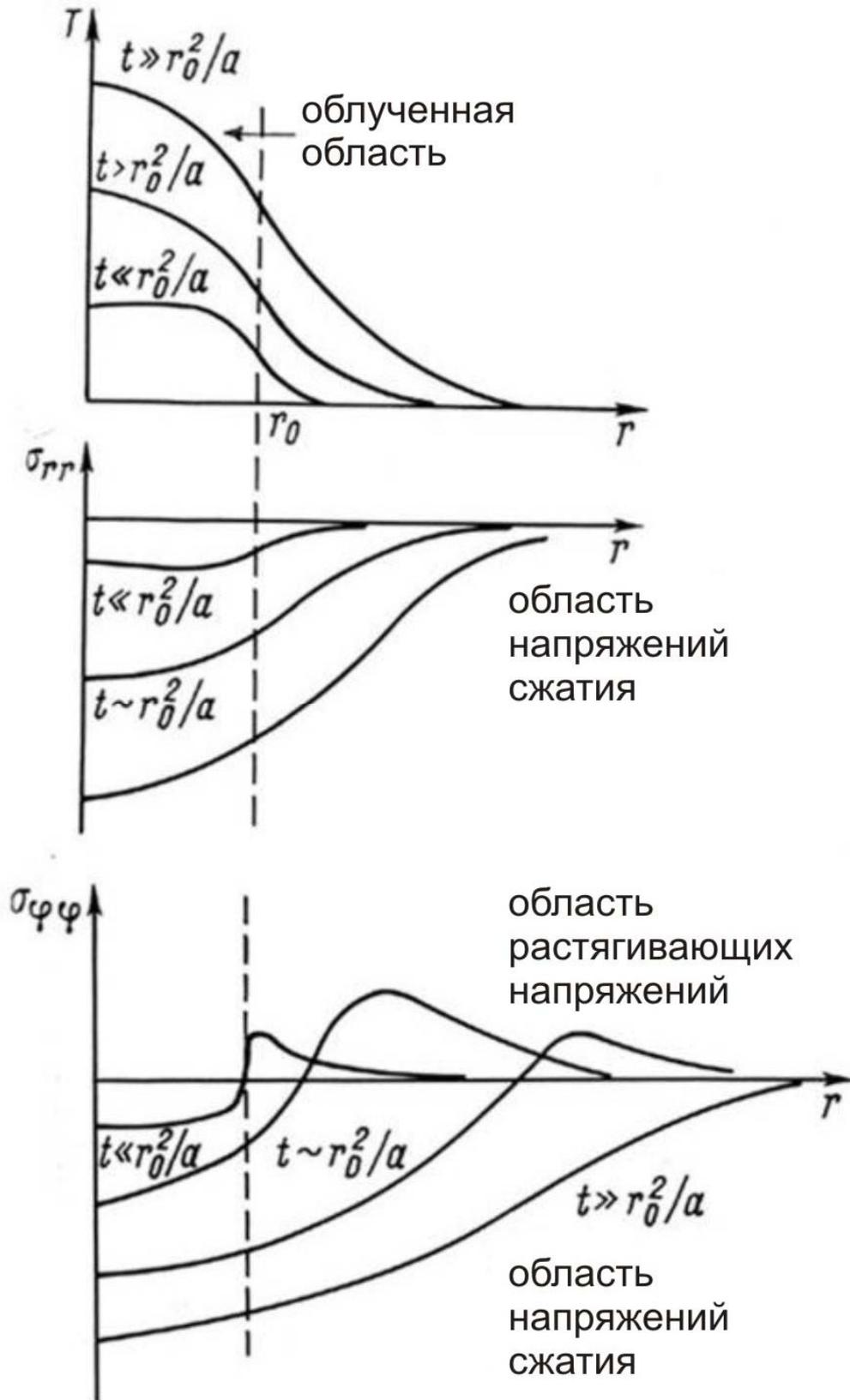
1 мкс



50 нс



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ T И НАПРЯЖЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛОКАЛЬНО ОБЛУЧЕННОГО УПРУГОГО МАТЕРИАЛА



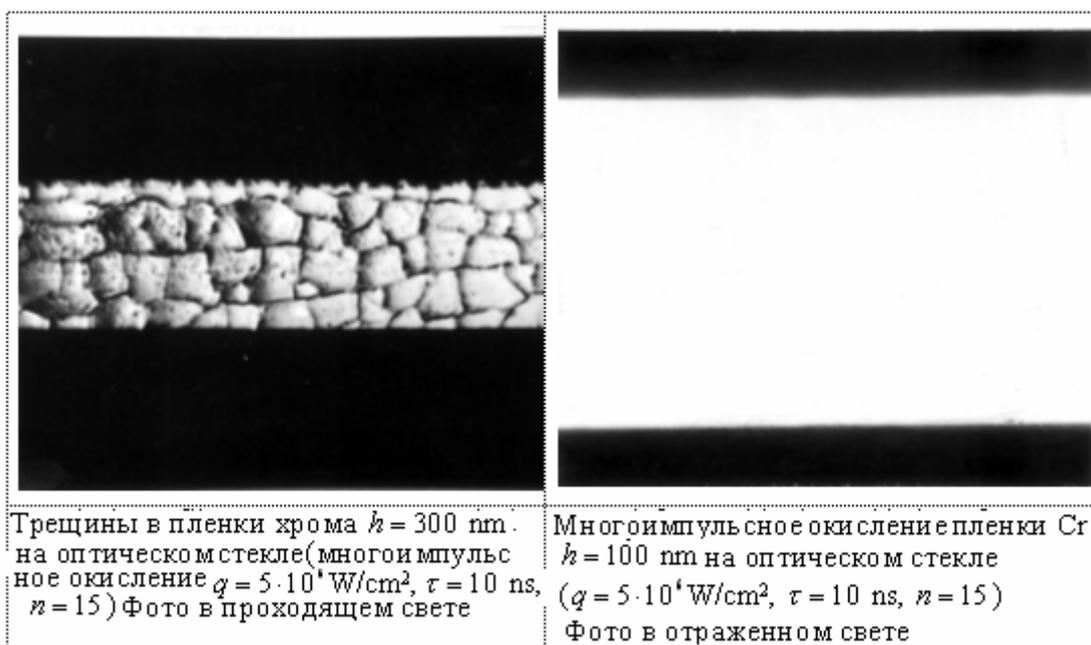
КРИТИЧЕСКАЯ ТОЛЩИНА ОКИСНОЙ ПЛЕНКИ

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОЯВЛЕНИЯ ТРЕЩИН ПРИ ТЕРМОХИМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ОБРАЗОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ (ТЕОРИЯ)

Пленка	Подложка				
	легкий крон	тяжелый крон	легкий флинт	тяжелый флинт	кварцевое стекло
Fe	180	100	70	60	200
Co	200	120	90	70	–
Cu	–	–	–	200	–
Ni	100	70	50	+	110
Sr	–	–	–	–	70
Ta	+	100	50	–	+
Zn	–	–	–	–	50

+ отсутствие трещин

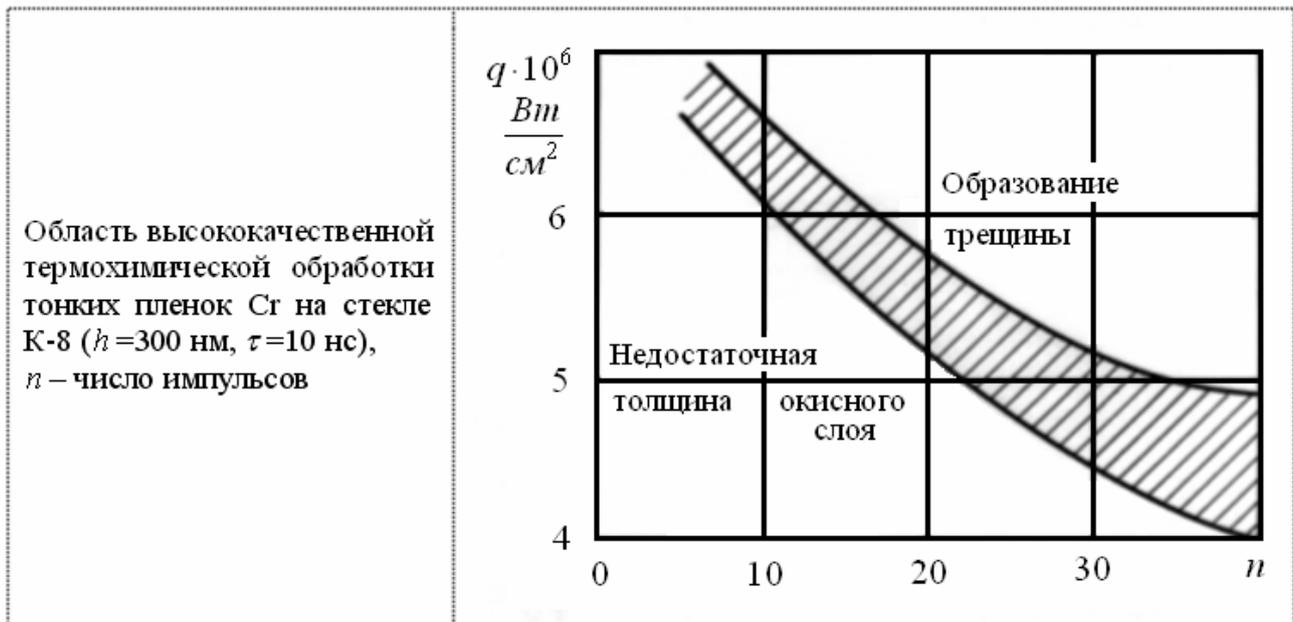
– образование трещин при любом значении толщины пленки



ПУТИ ИСКЛЮЧЕНИЯ ТРЕЩИН ПРИ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Выбор материала пленки и подложки:

- близкие значения коэффициентов теплового расширения;
- высокое значение температуры размягчения подложки;
- низкое значение температуры нагрева пленки;
- малая толщина пленки;
- качественная адгезия;
- многоимпульсный режим облучения.



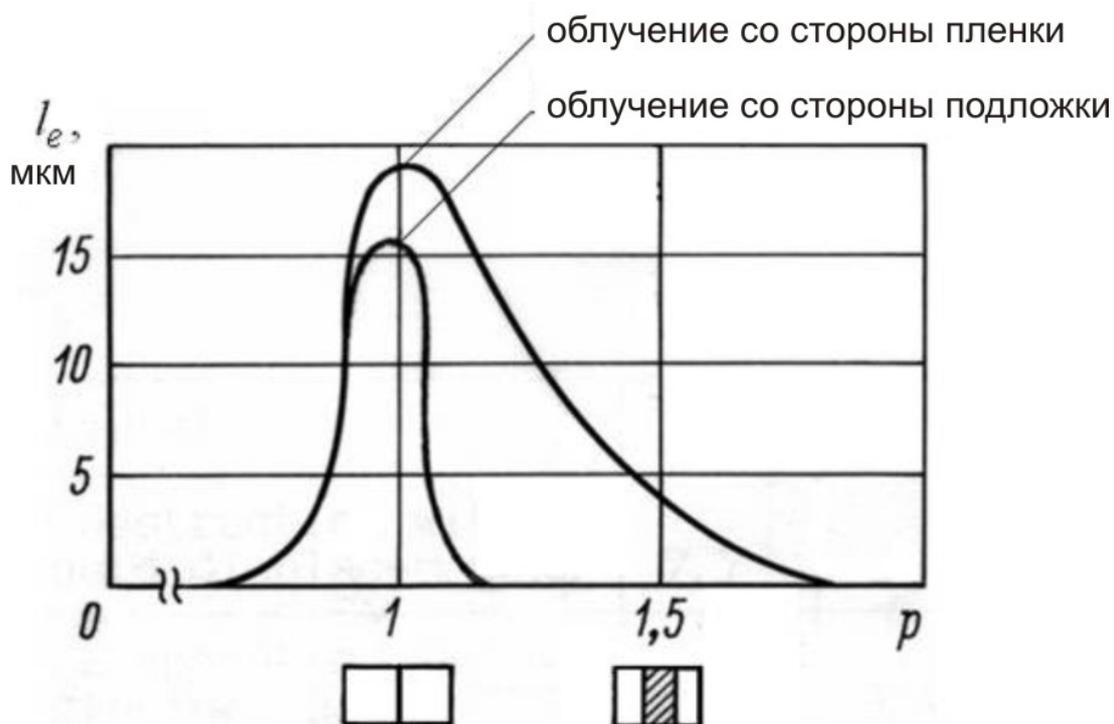
2.3.3. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИСКАЖЕНИЯ ПЛЕНОЧНОЙ ТОПОЛОГИИ вследствие перемещения расплава



3 мкм

Истечение расплава при различной степени перекрытия квадратных облученных зон ($h = 100$ нм, $q = 10^8$ Вт/см²).

Длина разлета расплава как функция степени перекрытия ρ



$$\rho = \frac{l_0 F}{U}, \text{ где}$$

l_0 - размер облученной зоны в направлении движения;
 F - частота повторения импульса;
 U - скорость движения образца (относительно лазерного пучка).

МАССА ЖИДКОСТИ, ВЫТЕСНЕННОЙ ЗА ПРЕДЕЛЫ ЗОНЫ РАЗРУШЕНИЯ

Критерий двухфазного механизма разрушения:

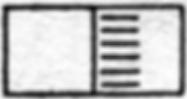
$$K = \frac{h_0 \omega}{l_0 V} \left| \begin{array}{l} K < 1 \Rightarrow m_l < m_v \\ K \gg 1 \Rightarrow m_l \gg m_v \end{array} \right.$$

h_0 - исходная толщина пленки;
 ω - скорость течения жидкости в зоне облучения;
 V - коэффициент парообразования;
 l_0 - размер зоны облучения;
 m_l - масса жидкости;
 m_v - масса пара.

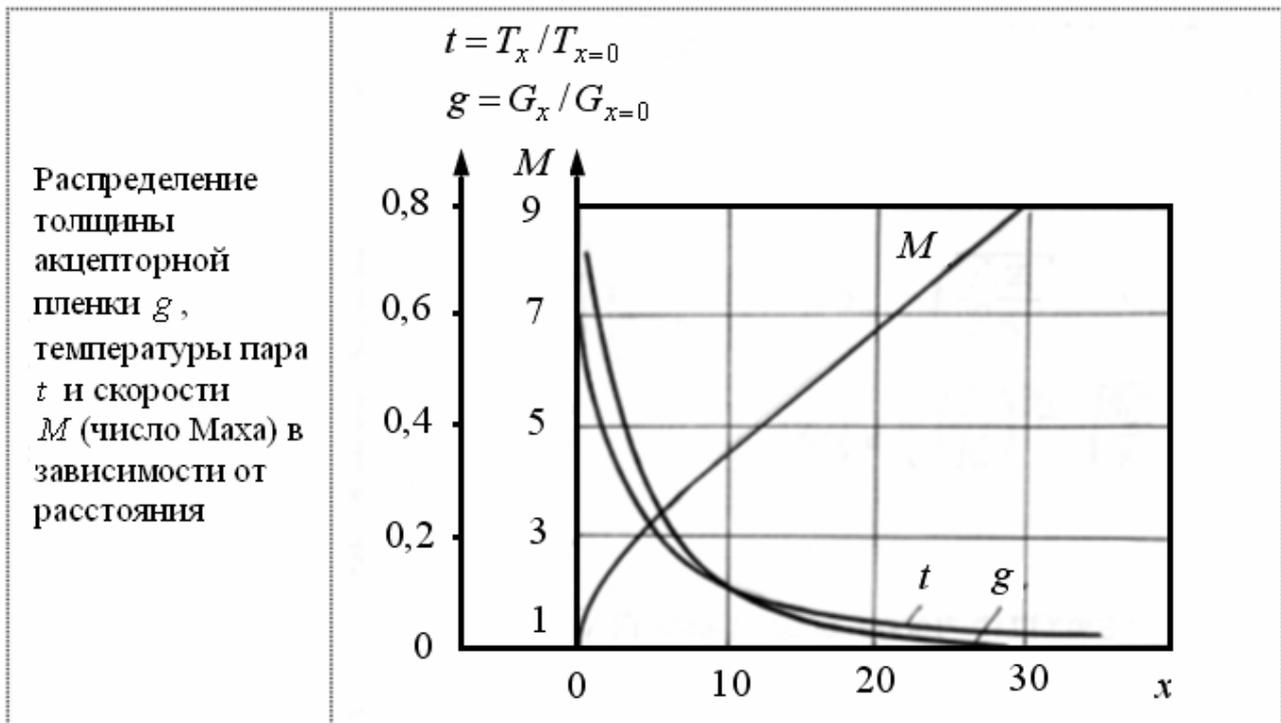
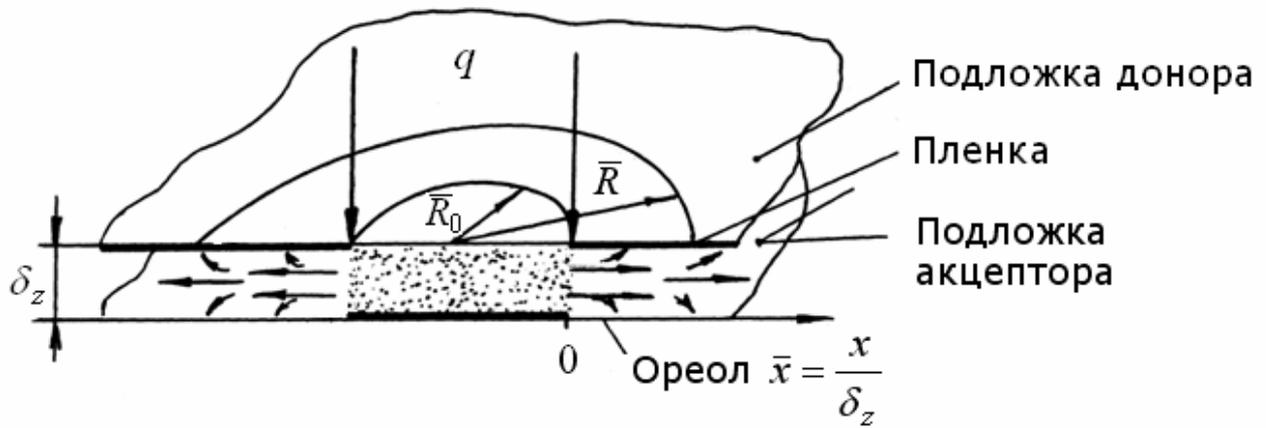
Режим отсутствия вытеснения жидкости:

Материал пленки		Al	Cr	Ag
Вычисленные пороговые величины,	разрушения без вытеснения жидкости,	7,7	18,0	10,5
	начала испарения,	0,88	8,48	8,24
	полного испарения,	24,8	88,0	98,4

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ

Вид	Проявление	Источник	Значение (м) при $\tau = 10$ нс	Пути уменьшения
	Затекание углов	течение жидкости	10^{-5}	Увеличение q, n , уменьшение τ, h
	Появление валика и капель	выдавливание и разбрызгивание жидкости	10^{-6}	Уменьшение q, h , увеличение σ, n , испарение с задней стороны
	Неравномерная обработка больших и маленьких элементов		10^{-6}	Уменьшение q, a , контурно-проекционный метод

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ИСКАЖЕНИЯ

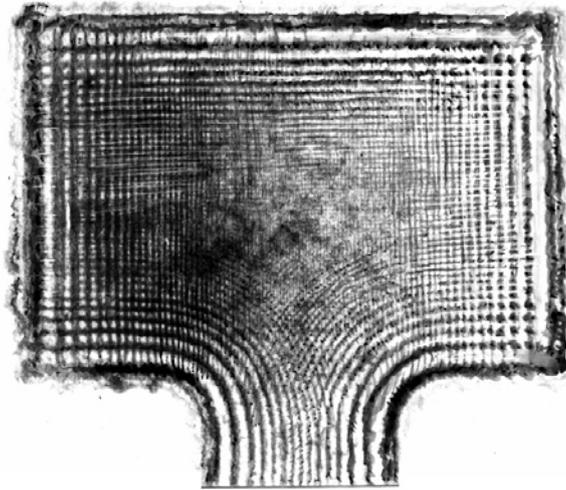


Пути уменьшения газодинамических искажений:

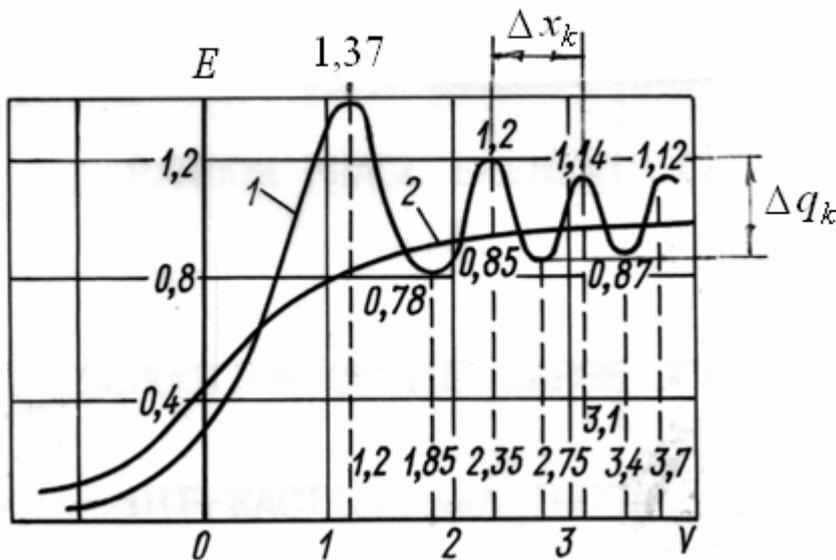
- уменьшение δ_z ;
- уменьшение h
- уменьшение q

2.3.4. ОПТИЧЕСКИЕ ИСКАЖЕНИЯ.

ДИФРАКЦИЯ КОГЕРЕНТНОГО СВЕТА



Регистрация дифракции на отверстиях путем испарения Cr-пленки ($h = 100$ нм) (теневая техника, зазор маска-подложка $z = 250$ мм), $\tau = 10^{-7}$ сек, лазер на стекле с Nd.



$$\Delta x_k = \sqrt{\frac{\lambda z}{2k}}$$

$$\Delta q_k = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{3/2} \sqrt{\frac{\pi}{k}}$$

Распределение интенсивности в зоне Френеля при дифракции на крае щели для когерентного (1) и некогерентного (2) света,

z - расстояние между маской и образцом, k - порядок дифракции, λ - длина волны.

Для получения контурного изображения маски:

$$0,73 \cdot q_{\text{пор}} < q < 0,83 \cdot q_{\text{пор}}$$

ИСКАЖЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ВСЛЕДСТВИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

Характерный размер неравномерности на маске:

$$d_M < l_m < \frac{\sqrt{a\tau}}{\beta_p}$$

d_M — размер маски

β_p — увеличение проекционной системы

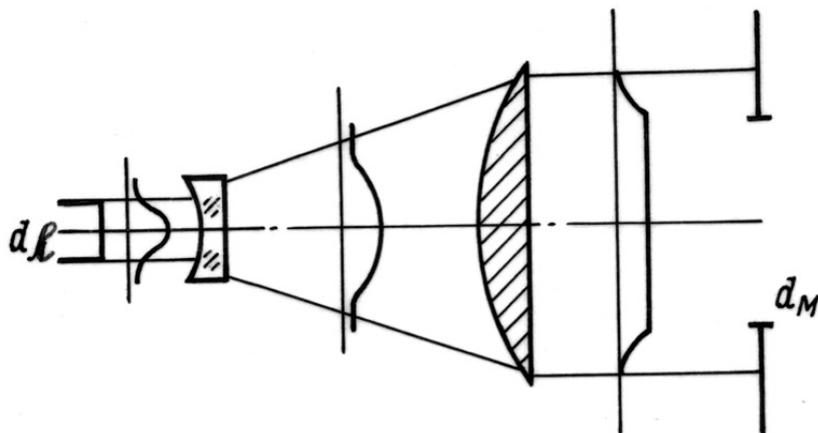
$\sqrt{a\tau} = 1$ мкм	$\beta_p = 1/10$	$l_m = 10$ мкм
	$\beta_p = 1/100$	$l_m = 100$ мкм

УМЕНЬШЕНИЕ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕРАВНОМЕРНОСТЕЙ:

– фазовые элементы со случайным распределением фазы (например, матовое стекло).

УМЕНЬШЕНИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ НЕРЕГУЛЯРНОСТЕЙ:

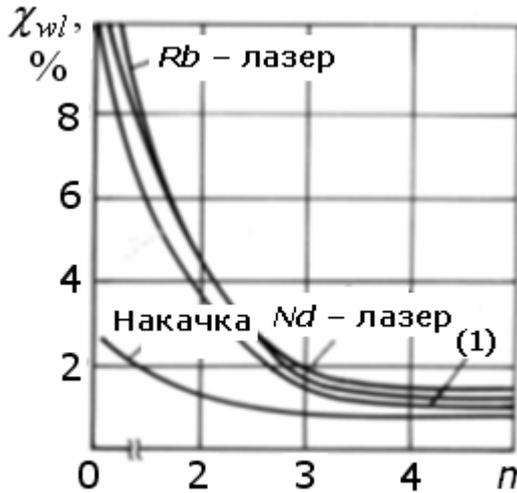
- дифракционные решетки,
- линзовые растры,
- абберационные оптические системы с поперечно изменяющейся толщиной;
- поглощающие оптические элементы.



ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ОПТИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ

Вид	Проявление	Источник	Пути уменьшения
<p>Дифракция</p> 	Искажения формы и размера, перераспределение интенсивности	Неточность расположения плоскости изображения, конечный размер апертуры проекционного изображения	Контроль точности расположения, расчет апертуры
<p>Аберрация</p> 	Искажения формы и размера	Аберрации оптических систем, неточность настройки	Расчет аберраций, настройка
<p>Нерегулярность интенсивности</p> 	Неравномерная обработка различных элементов рисунка	Нерегулярность выходного пучка лазера, перераспределение интенсивности в оптических системах	Улучшение распределения лазерного излучения, корректировка распределения оптическими средствами
<p>Неоднородное облучение области изображения отверстия</p>	Шероховатость края изображения	Неточность расположения элементов изображения, неоптимальная форма элемента	Выбор рационального элемента изображения, настройка
<p>Нестабильность размера и формы изображения</p> 	Изменение размера (и формы) изображения от импульса к импульсу	Нестабильность лазерных параметров, изменение параметров оптических элементов	Стабилизация лазерных параметров и оптических элементов

2.3.5. СТАБИЛЬНОСТЬ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. СТАБИЛЬНОСТЬ ПАРАМЕТРОВ



$$K_{W_{\text{нак.}}^{\text{пор.}}} = \frac{n}{n-1} K_{W_{\text{нак.}}} \quad (1)$$

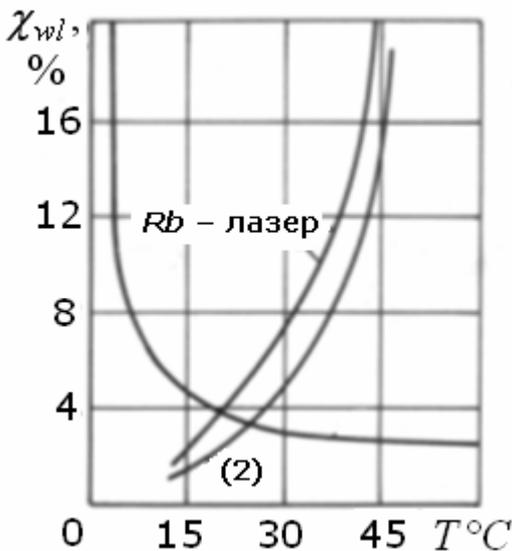
$n = \frac{W_{\text{нак.}}}{W_{\text{нак.}}^{\text{пор.}}}$ — степень превышения порога генерации;

$K_{W_{\text{нак.}}^{\text{пор.}}}$ — относительная неустойчивость лазерной энергии;

$K_{W_{\text{нак.}}}$ — относительная неустойчивость накачки;

$W_{\text{нак.}}$ — энергия накачки;

$W_{\text{нак.}}^{\text{пор.}}$ — пороговая энергия накачки;



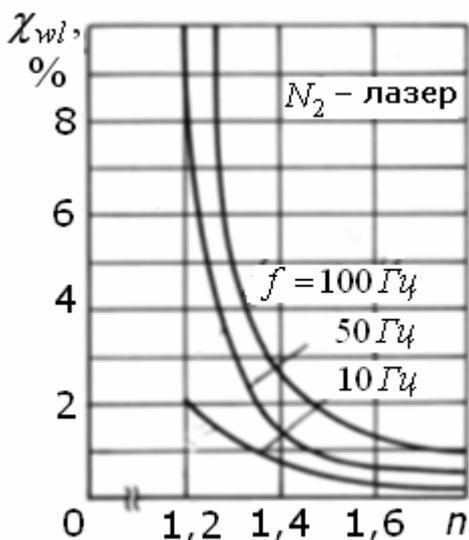
$$K_{W_t} = \frac{2}{n_T^2 - 1} K_T$$

K_T — относительная неустойчивость температуры;

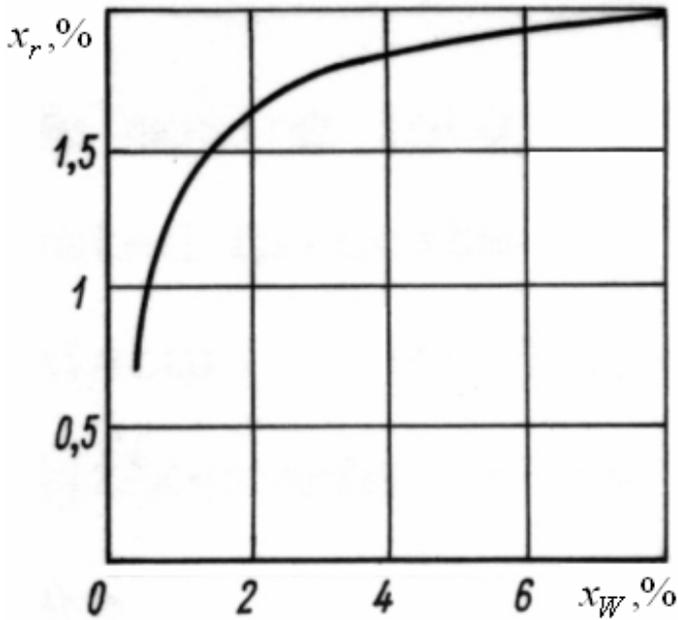
$$n_T = \frac{T_{\text{max}}}{T}$$

T_{max} — максимальная температура генерации;

T — рабочая температура



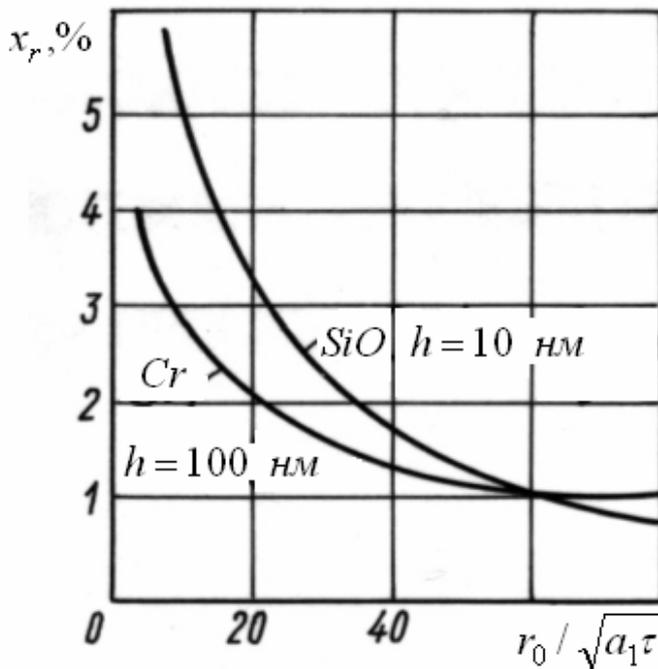
ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



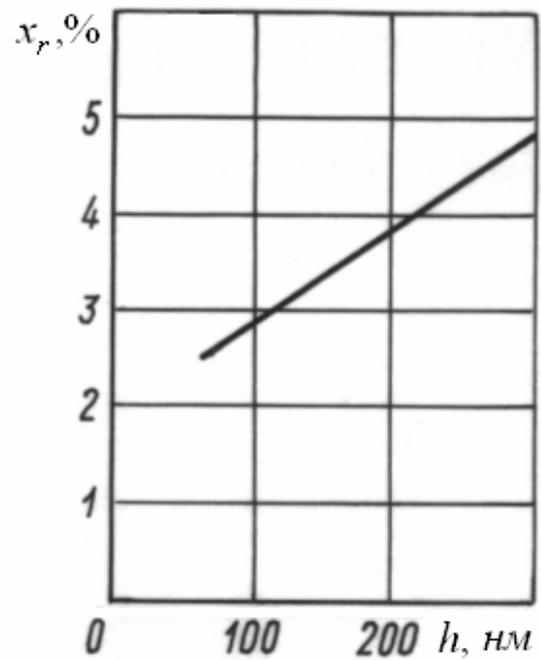
Изменение размера
отверстия в пленке:

$$k_r = \frac{\Delta r}{r} = k_{W_1} \frac{\pi \sqrt{a_1 \tau}}{2r_0}$$

Cr, $r_0 = 40 \text{ нм}$, $h = 100 \text{ нм}$ $f = 50 \text{ Гц}$



$k_{W_1} = 0.5\%$, $n = 1.6$, $f = 50 \text{ Гц}$



Cr, $r_0 = 40 \text{ нм}$

4. ОСНОВНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК

4.1. ТЕХНОЛОГИЯ ФОТОШАБЛОНОВ

При переходе в субмикронную (нанометрическую) область или область сверхбольших интегральных схем (СБИС) с размерами рабочих фотошаблонов до 10 см и с минимальными размерами элементов менее 1 мкм (100 нм и менее), технологические проблемы фотолитографии становятся все более существенными.

Самыми важными из них являются следующие:

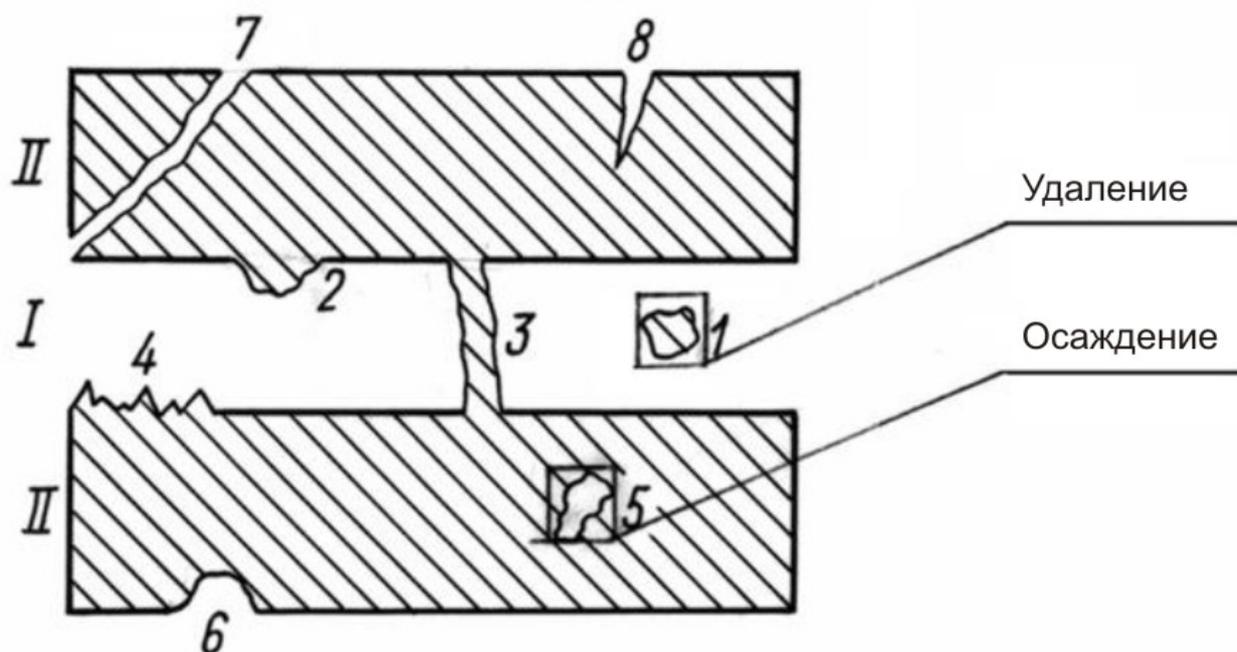
Проблема неизбежных дефектов фотошаблонов (ФШ), ведущая к потере элементов информации или полному выходу ФШ из строя. Другой стороной этой проблемы является уменьшение выхода годных СБИС и увеличение их стоимости.

Проблема сложности и большой длительности процесса изготовления фотошаблонов, многоступенчатость операций обработки фотошаблонов и невозможность их контроля в процессе обработки;

Проблема миниатюризации и интеграции на субмикронном (нанометрическом) уровне.

РЕТУШЬ ФОТОШАБЛОНОВ (1)

Все дефекты фотошаблонов могут быть классифицированы как **дефекты светлого поля** – недотравы (1), выступы (2), перемычки (3), неровности края (4) и т.д., и **дефекты темного поля** – проколы (5), вырывы (6), разрывы (7), царапины (8), «звездное небо» и т.д. (см. рис.)



Дефекты светлого поля устраняются посредством удаления пленки (Cr , Fe_2O_3) при облучении лазерными импульсами, используя микропроекторные методы (А) с квадратной формой лазерного пятна.

Проблема устранения дефектов темного поля в промышленном масштабе до сих пор еще не решена, хотя разработан и протестирован ряд лазерных методов их «исцеления». Наиболее совершенные из них – метод лазерного переноса пленок LIFT (см. ниже) и методы термо- и фотохимического разложения.

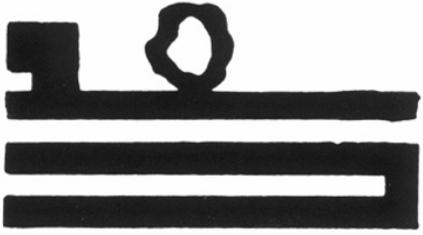
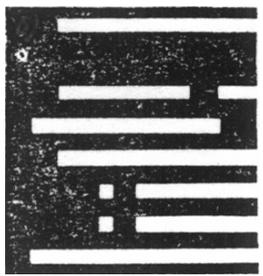
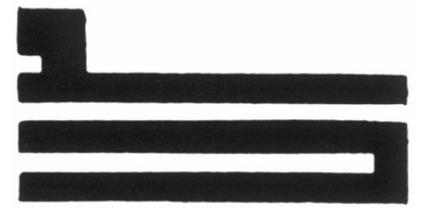
РЕТУШЬ ФОТОШАБЛОНОВ (2)

ОСНОВНЫЕ ДЕФЕКТЫ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ФОТОШАБЛОНОВ (ФМ) ДЛЯ БИС И ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДИ РАЗЛИЧНЫХ СЛОЕВ

Номер фото литографическо- го слоя	Среднее про- центное соот- ношение год- ных ячеек, %	Среднее процентное соотношение дефектных ячеек, %		
		Недотравы	Проколы	Недотравы и проколы
1	61.9	15.0	16.2	7.9
2	62.3	5.7	23.0	9.0
3	64.3	6.1	25.0	5.6
4	62.6	21.6	10.0	6.8

В позитивных шаблонах (первый и второй LIC слои) основными дефектами являются недотравы (15-20%), тогда как в негативных (второй и третий слои) наиболее обычные дефекты – это проколы (20-25%), то-есть, общее количество дефектных ячеек решетки довольно велико и достигает 30-35%. Очевидно, что, устранение только «недотравов» увеличит выход годных ФШ в среднем на 15-20%; дополнительное устранение «проколов» сделает возможным выпуск ФШ практически свободных от дефектов.

РЕТУШЬ ФОТОШАБЛОНОВ (3)

	<p>a</p>			
	<p>б</p>		<p>a</p>	<p>b</p>
	<p>в</p>		<p>Устранение проколов методом «LIFT»</p>	
<p>Отдельные этапы устранения дефектов при использовании локального лазерного удаления</p>			<p>а) до восстановления б) после восстановления</p>	
<p>а) до восстановления б) во время процесса в) после восстановления</p>				

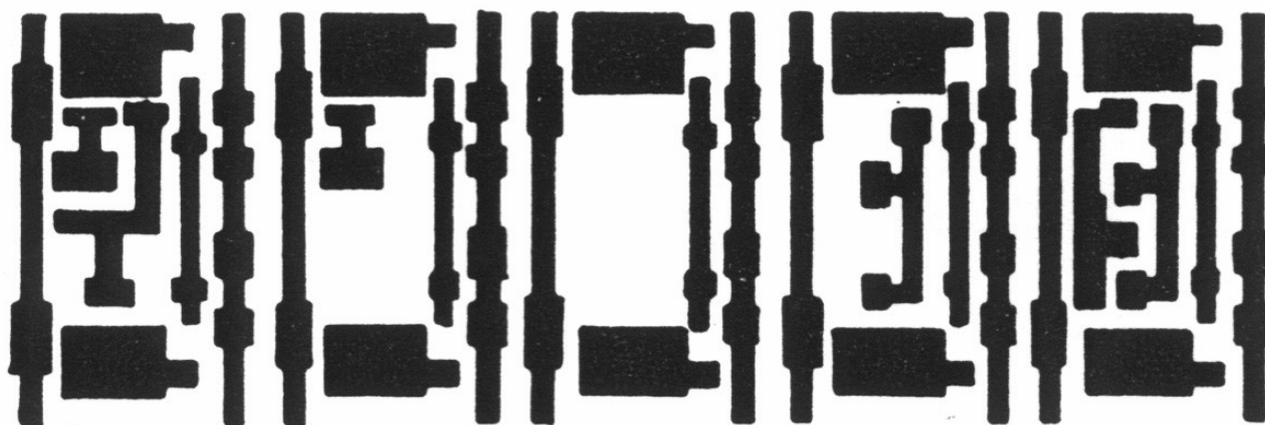
РЕЗУЛЬТАТЫ УСТРАНЕНИЯ ДЕФЕКТОВ СВЕТОГО ПОЛЯ (ВОССТАНОВЛЕНИЯ) ФОТОШАБЛОНОВ БИС

Общее число ячеек в рабочем поле ФШ	Общее число годных ячеек в рабочем поле ФШ		Средний рост числа годных ячеек
	до восстановления	после восстановления	
31 (100%)	16 (49%)	26 (72%)	23 %
55 (100%)	29 (59%)	41 (74%)	21 %

ОПЕРАТИВНАЯ КОРРЕКТИРОВКА ТОПОЛОГИИ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛЕНКИ

В дополнение к ретуши фотошаблонов, в **оперативной корректировке топологии** могут быть применены **лазерные способы сохранения**, а также **введение** или **удаление** отдельных частей. Оперативная корректировка топологии традиционными методами неизбежно влечет за собой повторение целого цикла разработки изделия, ведущее к значительной затрате времени и ресурсов. **Оперативная корректировка топологии особенно существенна при разработке и мелкомасштабном производстве экспериментальных интегральных схем.**

Пример такой методики представлен на рисунке, где изображена область фотошаблонов, нуждающаяся в корректировке. Позиции **b** и **c** показывают успешное удаление элементов, тогда как **d** и **e** – результат формирования новых элементов посредством прямым лазерным переносом «LIFT» и последующей лазерной коррекции краев и углов. Вся процедура была проведена в течение нескольких часов, тогда как ее осуществление традиционными методами потребовало бы две - три недели.



ОПЕРАТИВНАЯ КОРРЕКТИРОВКА ТОПОЛОГИИ И СПЕЦИФИКАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Возможности оперативной топологической корректировки могут быть широко применены в производстве ПЗУ (долговременной памяти-ROM) на больших интегральных схемах (БИС). Информация может постоянно сохраняться либо благодаря выжигаемым соединениям из материала с низкой точкой плавления, либо путем изменения 1С-топологии на уровне изготовления шаблонов. Целесообразно проводить последнюю операцию, используя лазерное испарение,. Фактически, особенности фотошаблонов для специализированных интегральных схем – это регулярность их структуры и постоянное количество основных слоев. В зависимости от цели ПЗУ изменяется только образец матрицы памяти, в то время как топология элементов управления остается неизменной. Таким образом, изготовление набора ФШ упрощается до производства нового ФШ непосредственно для слоя, топология которого должна быть модифицирована. Таблица показывает результаты исследования стоимости и технологической эффективности базы данных на чипах БИС ПЗУ, изготовленных посредством вышеописанной процедуры. Было подсчитано, что выход годных БИС составил 2%, выход годных ячеек решетки – 50%, число суперпозиций – 100 при скорости движения координатного x-y стола– 10 мм/мин, емкость памяти – 4096 бит/чип.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОИЗВОДСТВА БИС ПЗУ ПОСРЕДСТВОМ ЛАЗЕРОВ

Вид фотошаблонов	Число заказанных чипов	Максимальный размер пятна, испаренного одиночным импульсом	Время обработки слоя, мин	Частота повторения импульсов, Гц	Мощность в импульсе, кВт
Рабочий	1–93	10^2	40–60	120–150	3–5
Эталон	94–3100	10^2	40–60	120–150	3–5
Начальный	Более чем 100	10^4	5–10	15–20	100

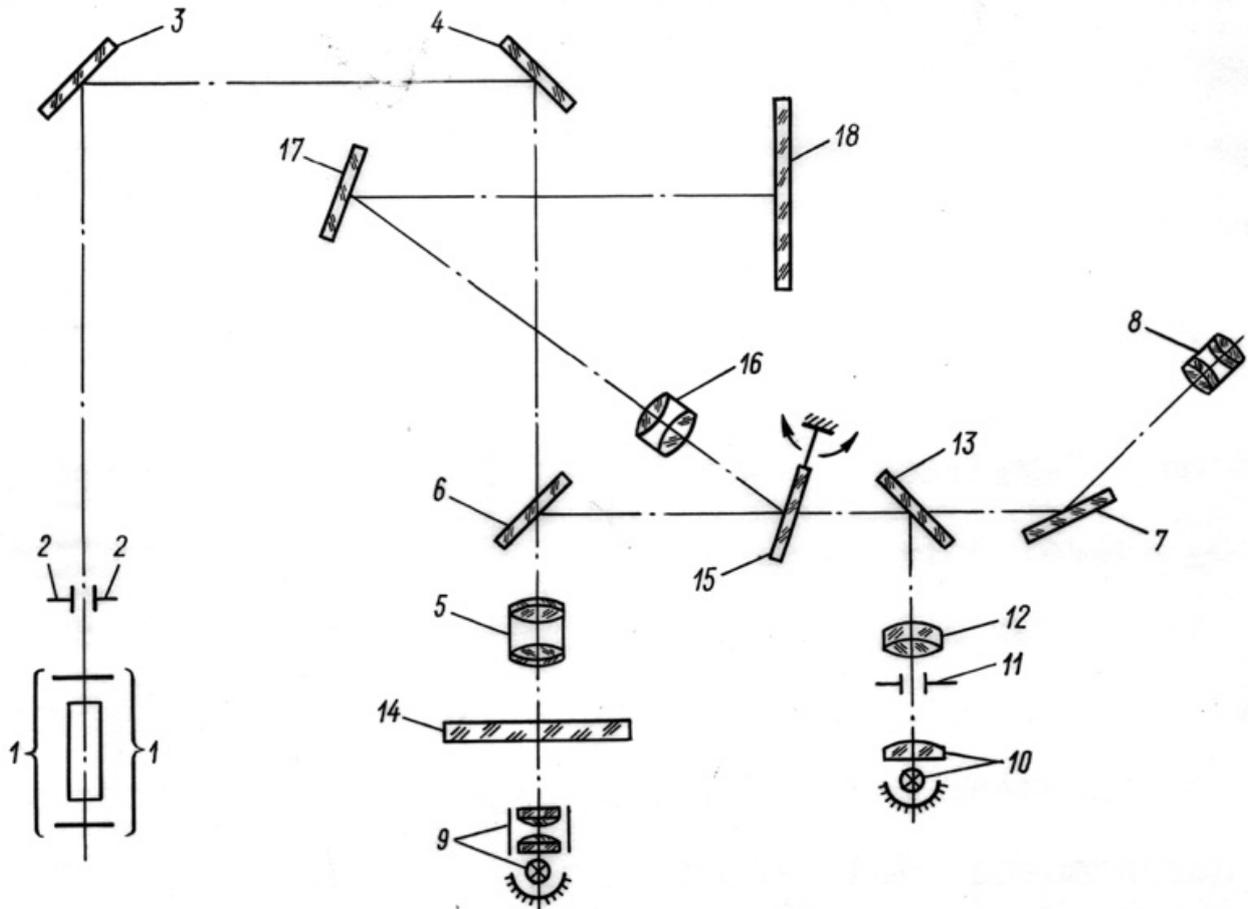
ЛАЗЕРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РЕТУШИ ФОТОШАБЛОНОВ И ОПЕРАТИВНОЙ КОРРЕКТИРОВКИ ТОПОЛОГИИ (1)



Параметры установок/ наименование	EM- 551	EM-551 A	EM-551 B
Минимальный размер удаляемой квадратной области при толщине 100 нм	20x20	25x25	2x2
Диапазон перемещений рабочего стола, мм	100x100	150x150	150x150
Скорость движения стола, мм/с		0. 015–5	
Производительность, ФШ/час	1	10	10

ЛАЗЕРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РЕТУШИ ФОТОШАБЛОНОВ И ОПЕРАТИВНОЙ КОРРЕКТИРОВКИ ТОПОЛОГИИ (2)

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ ЕМ–551
(КОНТУРНО–ПРОЕКЦИОННЫЙ МЕТОД)



1–7 — энергетический канал; 1 — лазер; 2 — диафрагма; 3, 4 — зеркала; 5 — микрообъектив; 5–13 — канал наведения; 6, 13 — полупрозрачные зеркала; 7 — зеркало; 8 — окуляр; 9, 10 — осветитель; 11 — управляющая диафрагма, 12 — линзы, 14 — фотошаблон; 15–18 — визуальный канал; 15, 17 — зеркала; 16 — объектив, 18 — экран.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФОТОШАБЛОНОВ (1)

Лазерные генераторы фотошаблонов на базе испарения материала экранирующего слоя значительно упрощают процесс изготовления фотошаблонов, уменьшают время изготовления, делают возможным контролировать топологию во время обработки и, при необходимости, удалить дефекты во время того же самого цикла.

Становится возможной полная автоматизация всего процесса проектирования интегральных схем вплоть до изготовления комплекта рабочих фотошаблонов.

Помимо испарения -«позитивный» метод, удобный для изготовления фотошаблонов с бедно насыщенными элементами слоями, разработан метод локального лазерного маскирования посредством окисления слоев пленки с последующим вытравливание необлученных частей – метод создания «негативного» изображения, предпочтительный для изготовления фотошаблонов, насыщенных элементами темного поля.

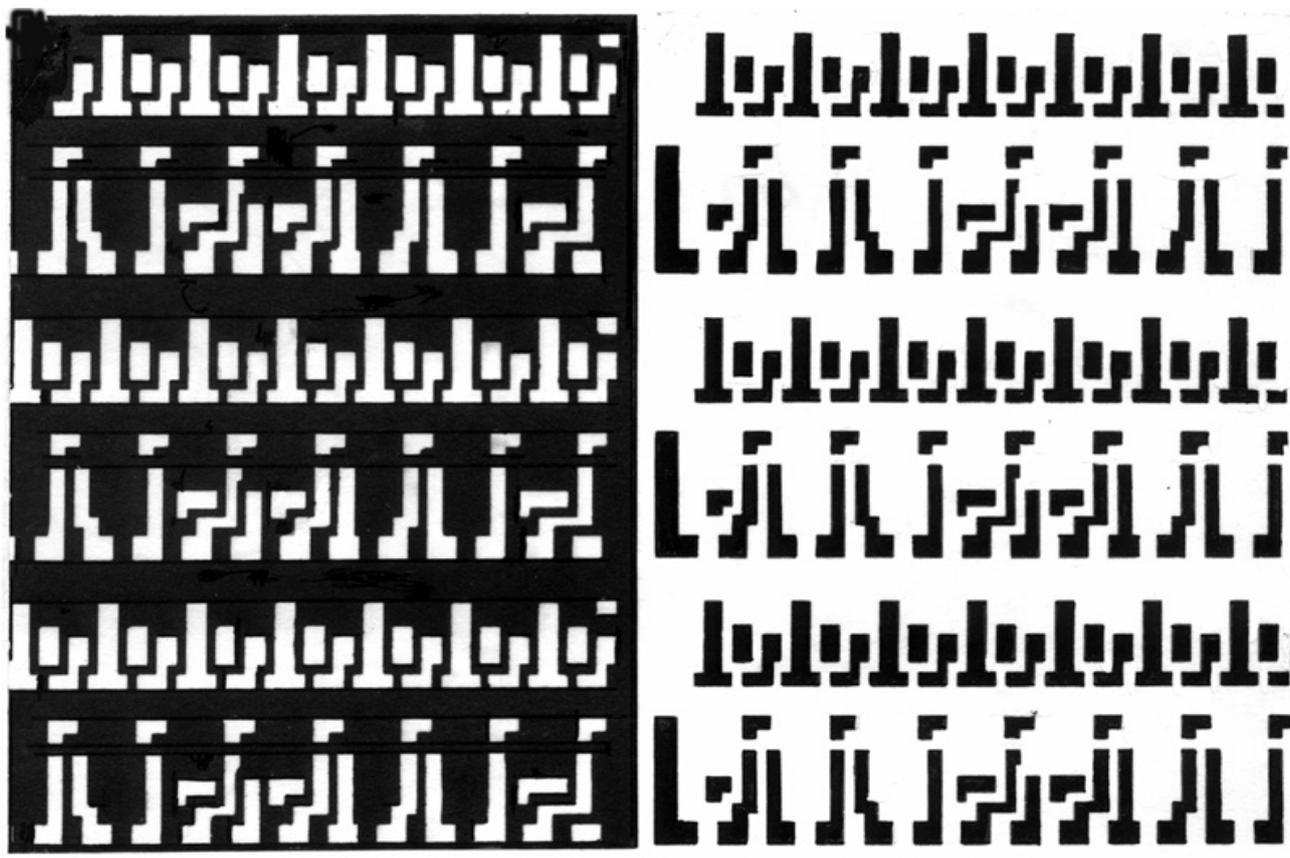
Третий режим– и следующий принцип создания лазерного изображения – фотолитографический, который отличается от установленного в обычных генераторах оптического изображения фактически только следующим. Вследствие высокой мощности излучения лазерный пучок делится на большое число лучей (16-32), которые затем направляются на пластину кремния, одновременно формируя топологию большого числа чипов, что дает значительное преимущество в производительности.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФОТОШАБЛОНОВ (2)

РЕЖИМ МУЛЬТИПЛИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Результаты, полученные в лабораторном применении микропроеекционного метода прямого испарения пленок и мультипликации изображения, следующие:

2,5 мкм минимальная толщина линии,
93% воспроизводимость элементов на поле 30x30 мм,
97–98% воспроизводимость масштаба фрагмента изображения на том же поле.



а

б

Участок фотошаблона, полученный путем микропроеекционного метода мультипликации ($h=200$ нм, $\tau=50$ нс): а) режим прямого испарения; б) режим окисления с вытравливанием.

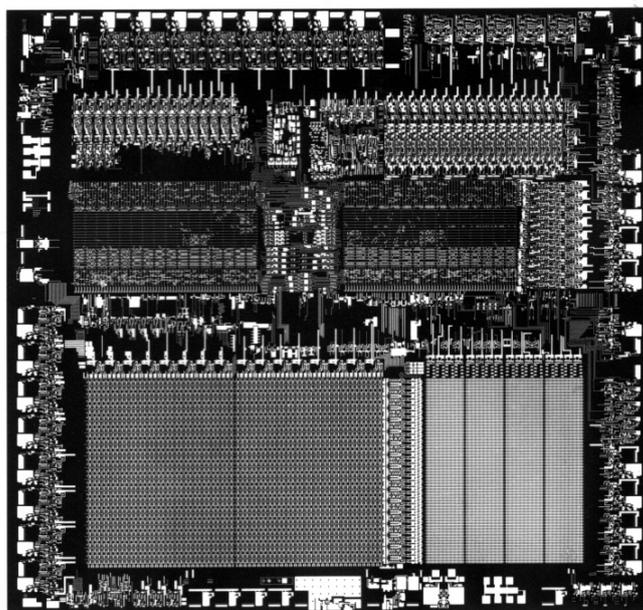
ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФОТОШАБЛОНОВ (3)

Производительность (линейная скорость) современных лазерных генераторов изображений (ЛГИ) – до 1 мм/с при скорости рисования линии изображения 50 мм/с. Время изготовления фотошаблонов резко уменьшается по сравнению с обычным фотолитографическим циклом и может быть доведено до нескольких часов.

На рисунке показаны фотографии фотошаблона, изготовленного на одном из ЛГИ за 5 часов. В таблице 5 приведены точностные характеристики лазерной обработки некоторых типов фотошаблонов.

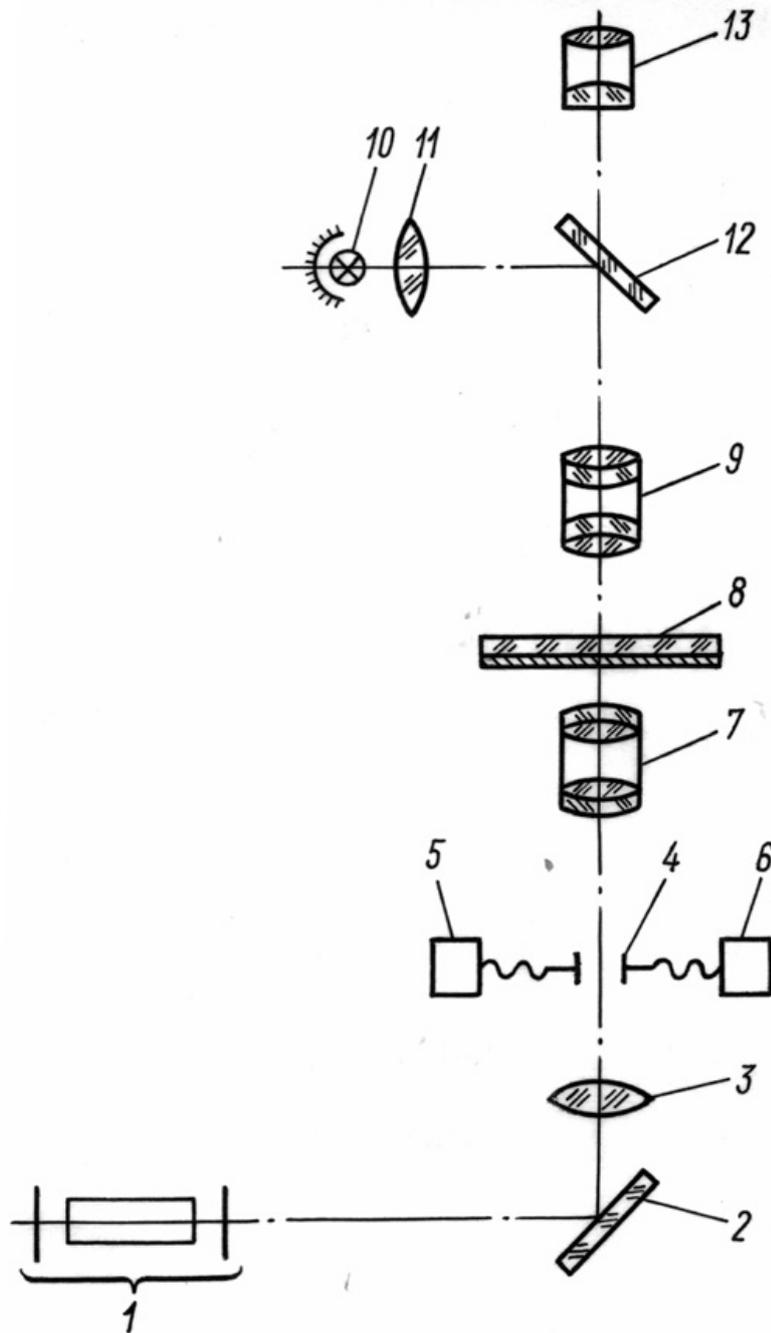
ТОЧНОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ ПЛЕНКИ ЛАЗЕРНЫМ ИСПАРЕНИЕМ

Материал пленки	Толщина, нм	Шероховатость углов, мм	Радиус угла скругления, мм
Хром	60	0.2–0.3	1.2
Алюминий	70	0.5–0.6	1.4
Оксид железа	100	0.8–0.9	1.6
Кремний	30	0.2	1.0



Фотошаблон , изготовленный на ЛГИ за 5 часов (режим испарения, метод фотонабора).

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФОТОШАБЛОНОВ (4) ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ЛАЗЕРНОГО ГЕНЕРАТОРА ИЗОБРАЖЕНИЯ (МЕТОД ФОТОНАБОРА)



1–7 — энергетический канал; 1 — лазер; 2 — зеркало; 3 — собирающая линза; 4 — управляемая диафрагма; 5, 6 — двигатели; 7 — проекционный объектив; 8 — фотошаблон; 9–13 — визуальный канал; 9 — оптический объектив; 10, 11 — осветитель; 12 — полупрозрачная пластинка; 13 — окуляр.

4.2. ФОРМИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Упомянутый выше режим формирования топологии «заказных» интегральных схем (схем с большой номенклатурой и небольшой серийностью, для которых обычный фотолитографический процесс изготовления фотошаблонов не целесообразен) с большой скоростью весьма конкурентоспособен.

Альтернативными лазерными методами прямого (без использования фотошаблонов) формирования топологии являются выше названные – локальный лазерно-индуцированный перенос пленок (LIFT) и нанесение пленок методом лазерно-химического осаждения (LCVD) из газовой фазы. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки.

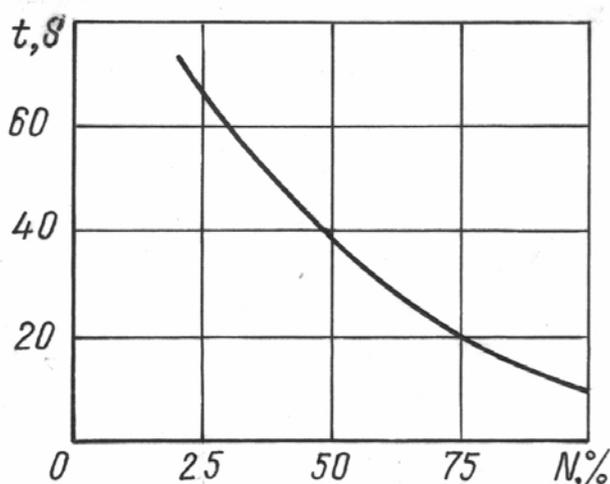
Очевидно, что первый метод технологически и конструктивно проще и химически более чист, в то время как второй предоставляет более широкие возможности в плане разнообразия осажденных слоев, являющихся не обязательно нанесенными заранее на донорные подложки. Наиболее вероятно, что первый метод найдет применение для формирования топологии одиночных металлизированных слоев. На базе второго может быть создана многослойная система с межсоединениями и с изоляцией между слоями.

Существуют дополнительные применения лазерных методов формирования топологии: в производстве больших гибридных интегральных схем (вместо фотохимических процессов). Наиболее важными из них являются методы прямого лазерного испарения, локальное формирование окисных слоев и другие термохимические методы.

4.3. ГЕНЕРАЦИЯ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ РИСУНКОВ ПУТЕМ ЛАЗЕРНОГО ОКИСЛЕНИЯ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК С ПОСЛЕДУЮЩИМ СЕЛЕКТИВНЫМ ТРАВЛЕНИЕМ (ЛОСТ)(1)

Окисление металла представляет особенный интерес, когда химическая стойкость и механическая прочность окислов позволяют создавать устойчивые «контактные» маски металлических пленок, защищая их от растворения. Обработка фотошаблонов из Cr после лазерного локального окисления обычной соляной кислотой с алюминиевым катализатором вызывает довольно быстрое растворение хрома, оставляя облученные зоны (защищенные Cr_2O_3) практически незатронутыми.

Скорость растворения хрома в HCl в присутствии сухого AlCl увеличивается с увеличением температуры и концентрации растворителя. Лучшие результаты в плане чувствительности вытравливания достигаются путем использования 50% раствора при комнатной температуре, когда время вытравливания необлученных зон хрома 15-20 секунд. Так как время растворения Cr_2O_3 значительно больше (1-2 часа), никаких заметных изменений облученных зон не происходит. Селективность растворения, то-есть соотношение скоростей растворения Cr и Cr_2O_3 – 20-100.

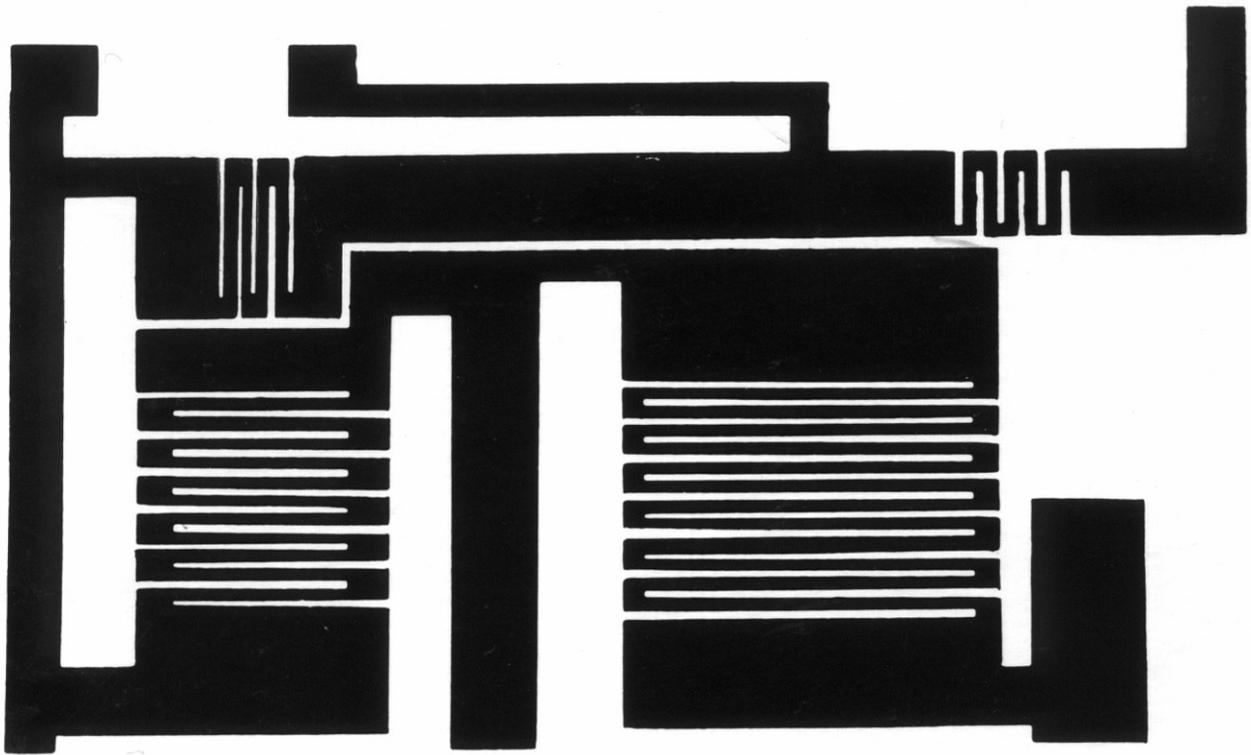


Время растворения пленки хрома толщиной 5 нм в зависимости от концентрации раствора HCl при $T = 300 \text{ K}$.

ГЕНЕРАЦИЯ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ РИСУНКОВ МЕТОДОМ ЛОСТ (2)

Несмотря на относительную сложность термохимического метода по сравнению с прямым испарением, его большая точность, меньшая степень влияния на качество подложки, возможность достижения «негативного» изображения маски, - все это делает его весьма перспективным.

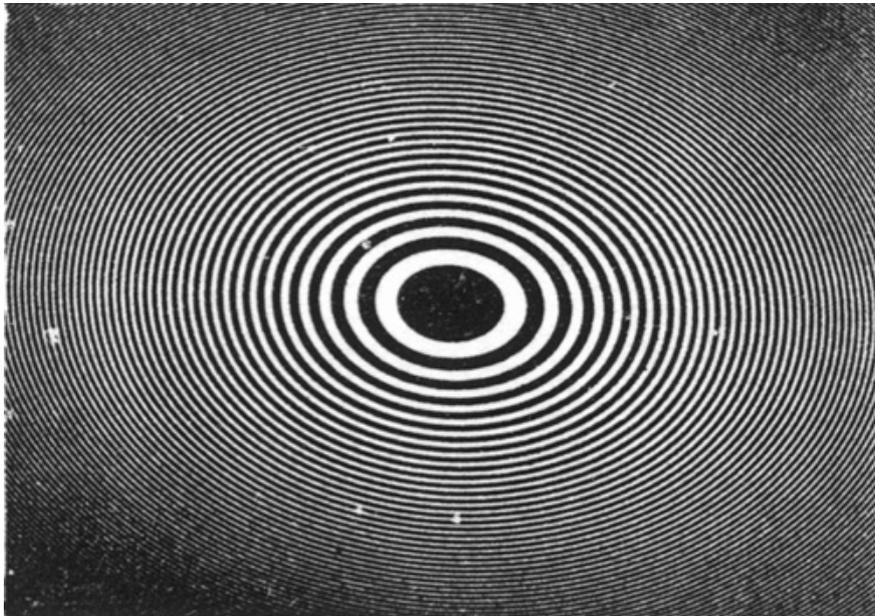
Фотография, приведенная внизу, демонстрирует образец фотошаблона, изготовленного путем облучения в проекционной установке 50 нсек импульсами лазера на стекле с Nd, с последующим вытравливанием хрома.



ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ (ДОЭ), ФОТОМАСОК, CD-ДИСКОВ, CD-ROM

Использование ДОЭ позволяет снизить число компонентов в оптических системах до одного элемента благодаря объединению функциональных качеств, присущих нескольким элементам. ДОЭ, объединенные с типовыми оптическими приборами, делают возможным уменьшить размеры, вес и стоимость обычных оптических приборов и разработать радикально новые оптические системы, не имеющие аналогов. Среди них: бифокальный микроскоп, оптический объектив для лазерного проигрывателя, преобразователь валкод, иммитаторы и корректоры больших астрономических зеркал и др.

Но изготовление ДОЭ является сложной технической проблемой, сравнимой по сложности с производством фотошаблонов СБИС.

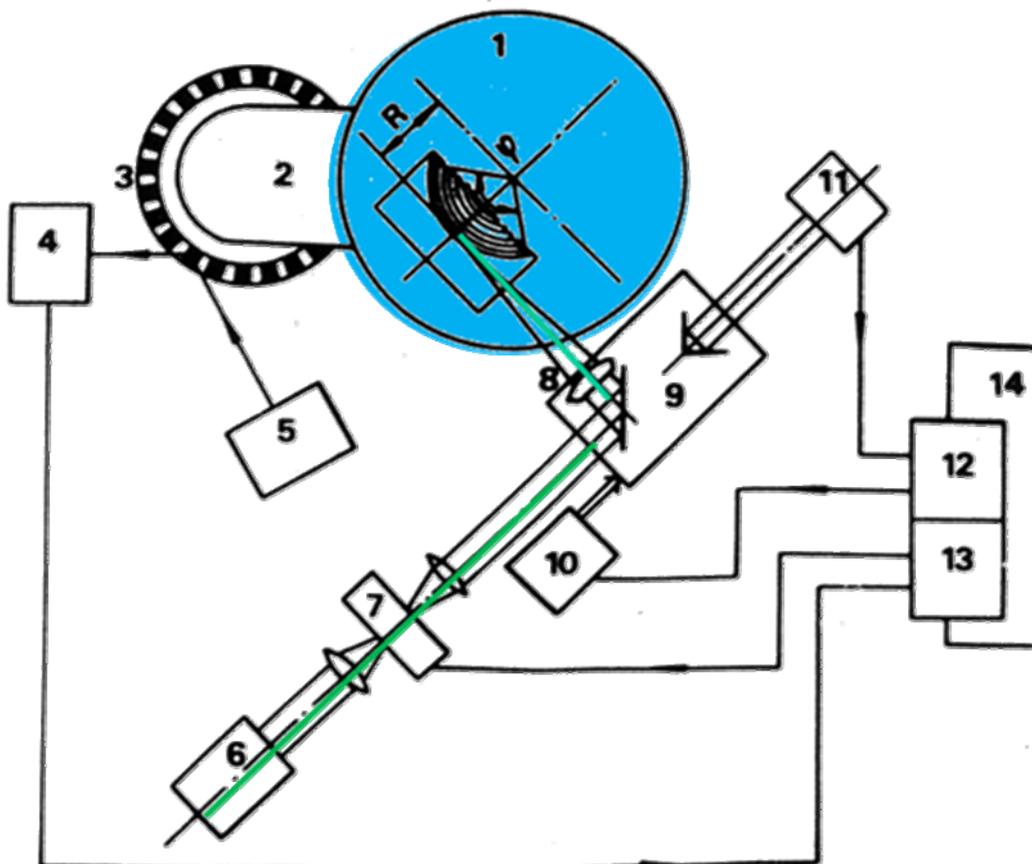


Фрагмент изображения асимметричной структуры: эллиптическая зонная пластинка (число зон 500). Полный диаметр элемента – 40 мм.

ЛАЗЕРНЫЙ ГЕНЕРАТОР КОЛЬЦЕВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Принципиальная схема

кольцевого лазерного записывающего устройства КЛЗУ-300



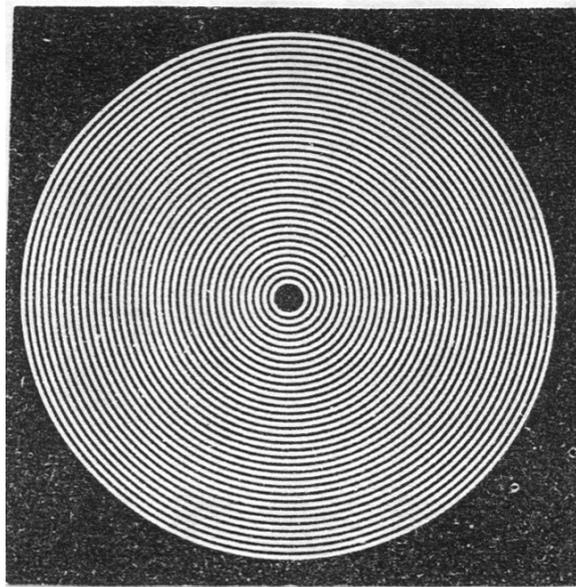
1 — подложка, 2 — вал; 3, 4, 5 — преобразователь вал-код; 6 — лазер; 7 — модулятор; 8 — микрообъектив; 9 — движущая каретка; 10 — линейный мотор; 11 — интерферометр; 12 — блок контроля перемещения; 13 — блок управления модулятора; 14 — компьютер.

Общий вид КЛЗУ-300

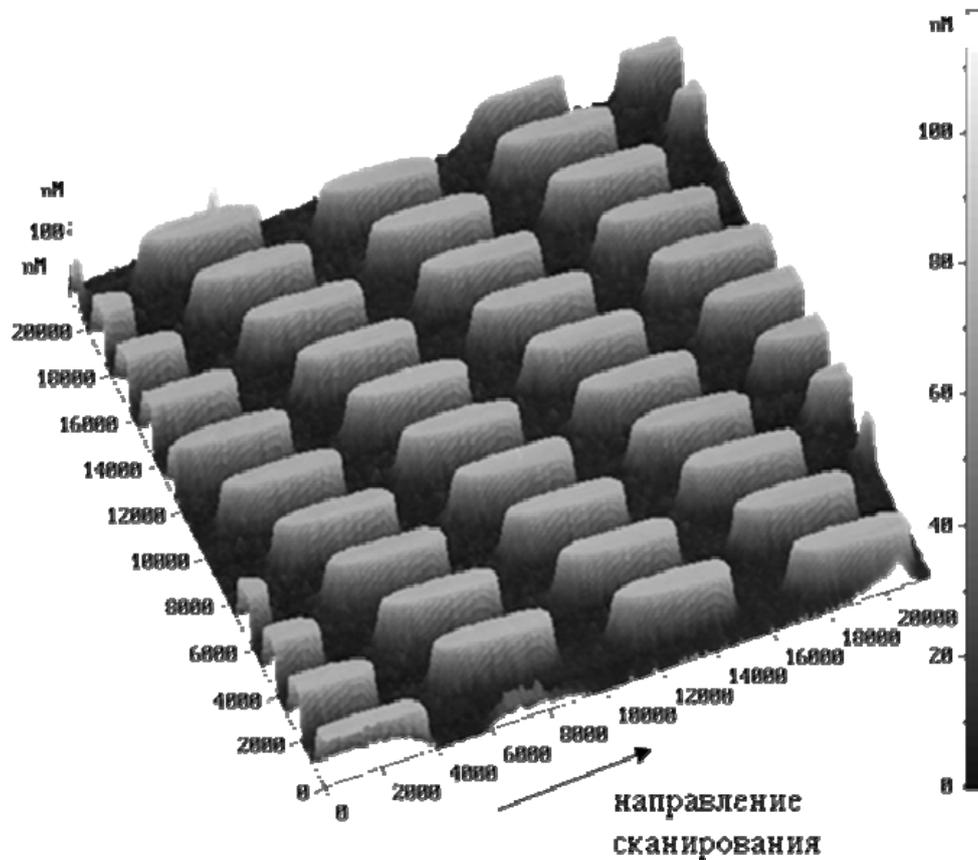


Диаметр точки	0.5 mm
Диаметр подложки	300 mm
Толщина подложки	1–25 mm
Радиальная точность	0.15 mm
Угловая точность	1.5 arc/sec

ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДОЭ



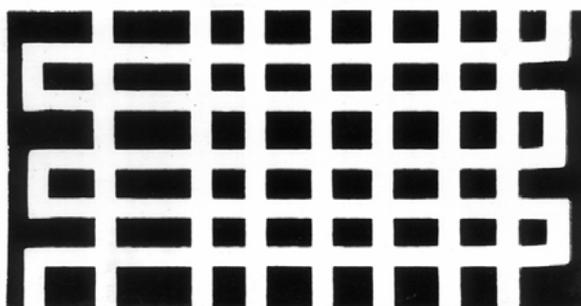
Фотошаблон ДОЭ для кольцевого формирования



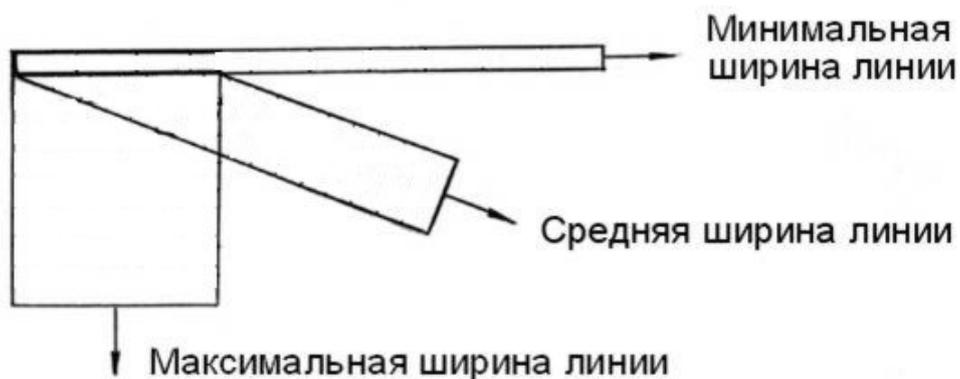
Термохимическая запись на пленке хрома-
AFM-фотография и рельеф тестового образца
(время экспонирования $t = 2.6$ мкс, толщина линии < 900 нм).

4.4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ШКАЛ, РЕШЕТОК И КОДОВЫХ МАСОК

Различные компоненты тонких пленок, такие как шкалы и сетки в оптических системах или кодовые маски в электрооптических преобразователях являются важными составляющими многих современных приборов. Они отличаются от фотошаблонов простотой и меньшей насыщенностью рисунка, который в общем состоит из комбинации прямоугольных элементов (линий) значительной длины (до 10 см) и отдельных дискретных элементов (прямоугольников) с размерами исходя из требуемых разрешающей способности и поля изображения, такими, чтобы сделать целесообразным использование контурно-проекторного метода с прямоугольным поперечным сечением (см. рис.) для производства компонентов с такой простой конфигурацией.

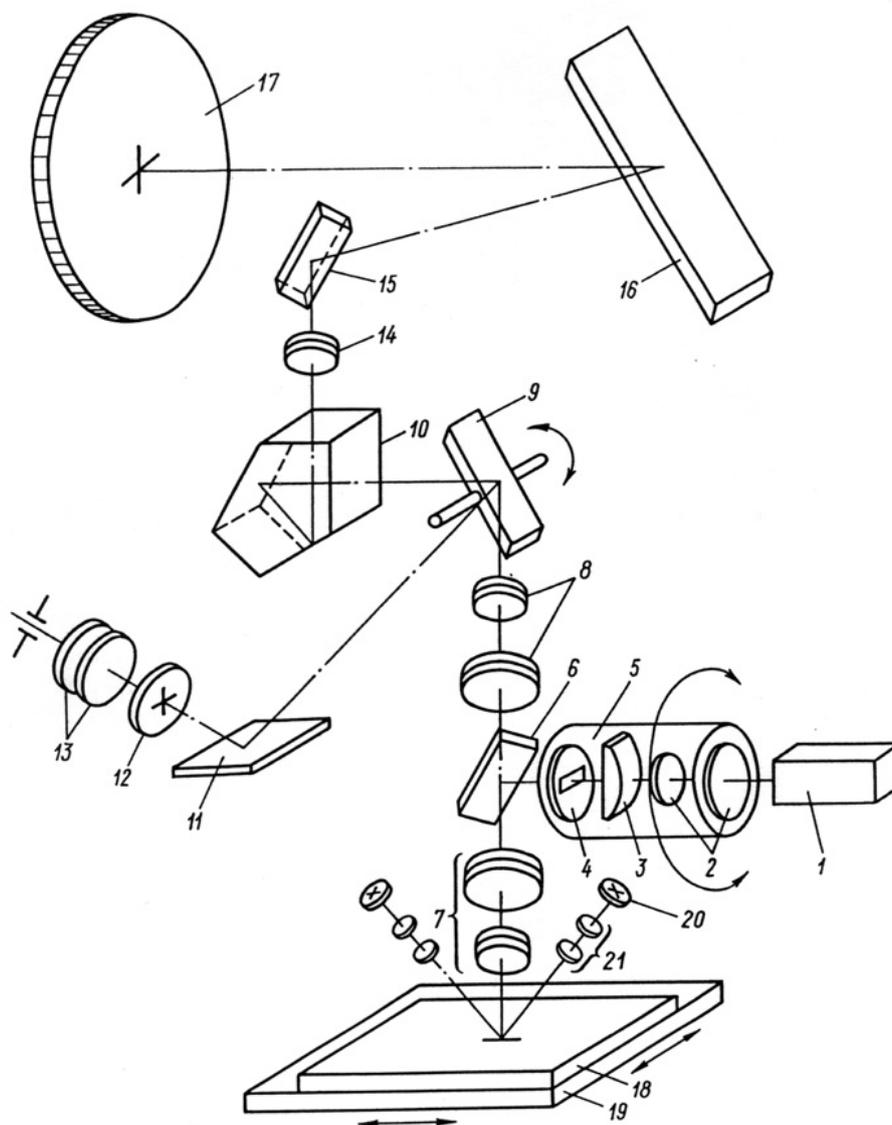


Процесс изготовления элементов указанного типа часто сталкивается с общей проблемой (особенно в случае кодовых масок), а именно, с тем, что ширина данного элемента должна быть минимальной, в то время как количество прошедшего света – максимальным; эти противоречивые требования могут быть удовлетворены путем формирования прямоугольных элементов с отношением сторон 10/1 и более.



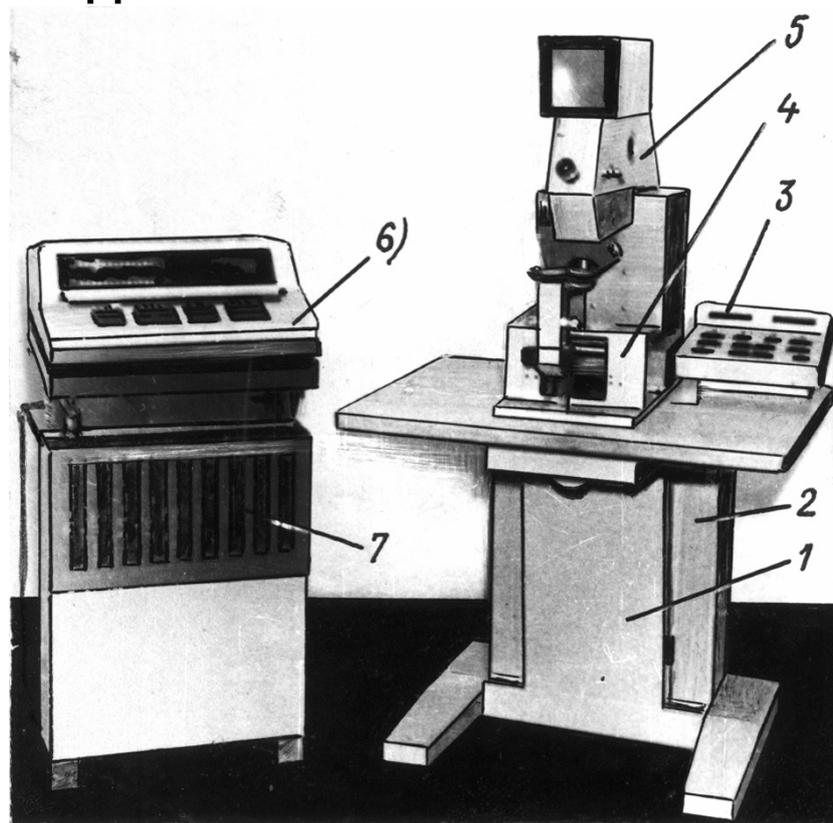
ЛАЗЕРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ШКАЛ И СЕТОК.

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ЛАЗЕРНОГО ГЕНЕРАТОРА ИЗОБРАЖЕНИЙ КПМ-1(КОНТУРНО-ПРОЕКЦИОННЫЙ МЕТОД)



1–7 — энергетический канал; 1 — лазер; 2, 3 — осветительная система; 4 — диафрагма; 5 — общая сборка осветителя; 6 — светоделительная пластина;
7 — микрообъектив; 8–17 — оптический канал;
8 — корректирующая система; 9, 11 —отклоняющие зеркала; 12 — перекрестие наводки; 13 — окуляр; 14 — проекционный объектив; 15, 16 — отклоняющие элементы; 17 — экран; 18 — объект (образец); 19 — координатный стол; 20 — источник света; 21 — конденсор.

ЛАЗЕРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШКАЛ



Лазерный генератор изображений КПМ-1.

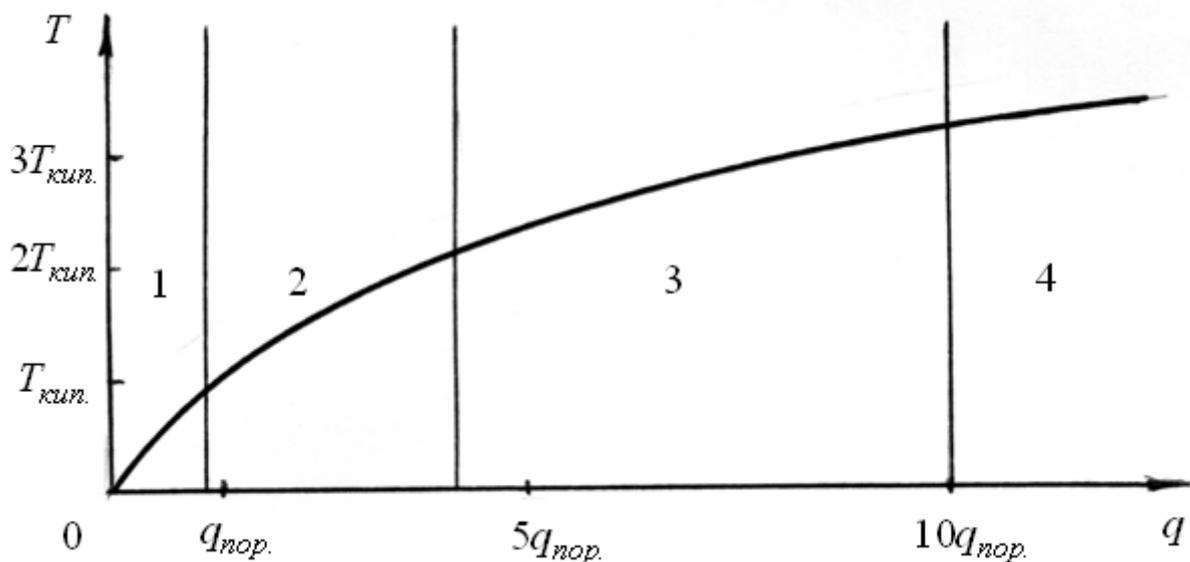
- 1 — корпус с лазером, 2 — блок питания, 3 — панель управления,
4 — рабочий стол, 5 — оптическая система,
6 — 7 — управляющая система

ПАРАМЕТРЫ

- Длина волны — 0.34 мкм
Максимальная мощность — 3 кВт
Длительность импульса — 10 нс
Максимальная частота повторения импульса — 100 Гц
Форма зоны обработки — прямоугольная,
Размер от 2x20 до 5x50
Максимальная скорость обработки — 10 мм/с
Максимальная толщина тонкой пленки — 200 нм
Увеличение экрана — 300
Увеличение окуляра — 150
Видимое поле экрана — 0.5 мм
Видимое поле окуляра — 1.0 мм
Рабочее перемещение стола — 80x80 мм
Точность позиционирования — 2 мкм.

4.5. ОСНОВНЫЕ РЕЖИМЫ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ПЕРЕНОСА ПЛЕНОК (ЛИП)

РАЗЛИЧНЫЕ РЕЖИМЫ ЛИП ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ
ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ Q И ТЕМПЕРАТУРЫ T



1. Зона низкопороговых механизмов (термомеханических, взрывных)–перенос структурно–чувствительных материалов.
2. Зона мягкого испарения и поверхностной конденсации– оптимальные режимы осаждения пленок.
3. Зона ионной имплантации (хорошая адгезия, глубина проникновения меньше 10 нм).
4. Зона глубокой имплантации - с существенными механическими напряжениями в подложке–зона скрайбирования слабо поглощающих подложек

ВАРИАНТЫ ЛИП

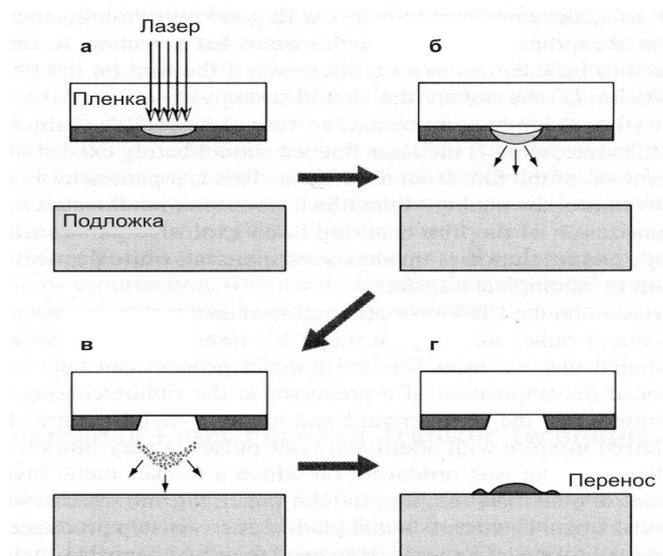


Схема ЛИП тонких пленок:
а) поглощение света и нагревание пленки;
б) удаление расплавленной пленки с поверхности донора;
в) осаждение паров и расплава на акцепторе;
г) общий вид осажденной пленки

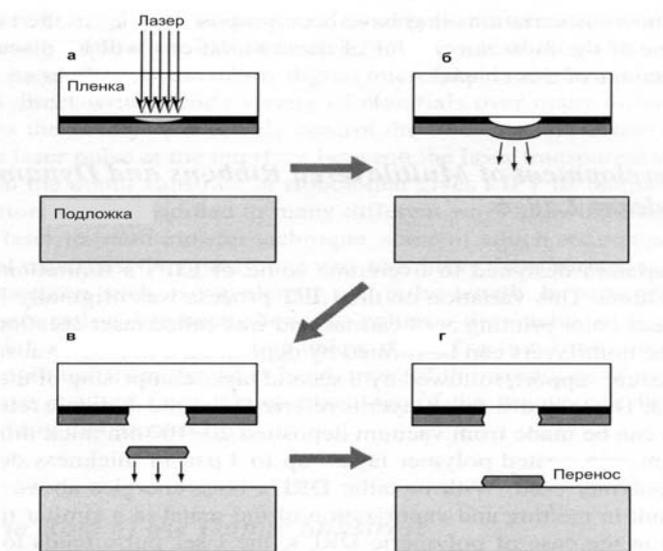


Схема ЛИП тонких пленок с промежуточным легко испаряемым слоем (ЛИС):
а) поглощение света ЛИС;
б) испарение ЛИС с образованием полости с повышенным давлением;
в) перенос функционального слоя на акцептор;
г) общий вид осажденной пленки

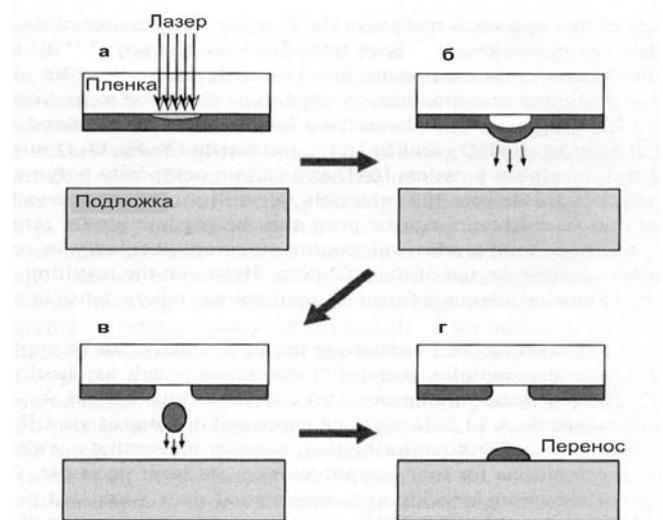


Схема ЛИП паст (реологических жидкостей, вязких «чернил» и т.п.):
а) поглощение света поверхностным слоем пасты;
б) нагревание и испарение объемного элемента пасты (вокселя) с поверхности донора;
в) перенос вокселя на акцептор;
г) общий вид осадка

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЛИП ДЛЯ ПЕРЕНОСА КОМПОНЕНТОВ

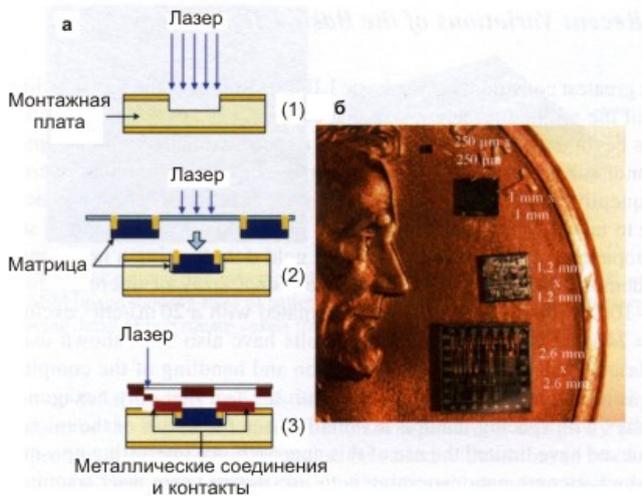
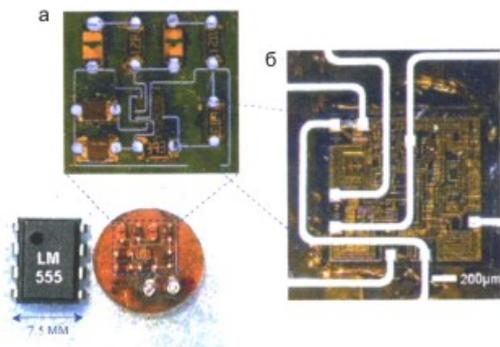
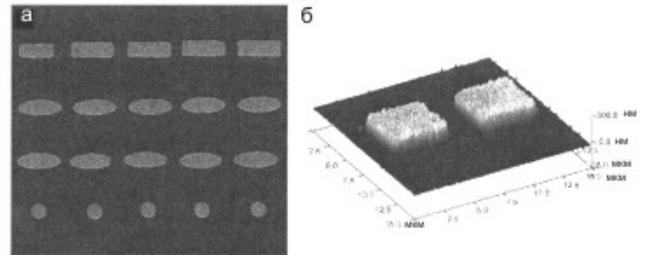


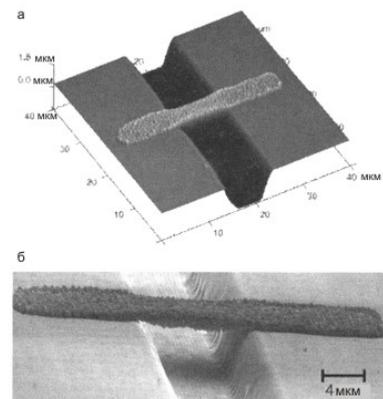
Схема «внедрения» электронных компонентов в подложку:
1) лазерная фрезеровка «кармана» в подложке;
2) перенос компонента в «карман» (lase-and-place);
3) ЛИП металлических межсоединений



Электронные схемы с LM555 п/п чипом в центре, внедренные методом ЛИП (а), его размеры рядом с тем же чипом в корпусе (внизу) и ЛИП межсоединения в той же схеме с большим увеличением (б)



Основные типы топологии осадков с использованием серебряной нанопасты (а); и AFM изображение двух квадратных вокселей Ag пасты, перенесенных на Si подложку (б)



AFM (а) и SEM (б) изображения Ag мостиков, нанесенных поперек 8 мкм щели в Si подложке

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ЛИП

LIFT – это метод, который дополняет все методы удаления (испарение, абляция) путем осаждения отдельных частей, элементов, слоев, символов, образцов и т.д.

ОСНОВНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА LIFT

1. Ретушь фотошаблонов интегральных цепей (устранение дефектов темного поля на пленочных покрытиях). Восстановление элементов на поверхностных акустических волнах.
2. Формирование топологии интегральных схем – прямое формирование топологии (Al резисторы и проводники на Si-пластинах и т.д.)
3. Подгонка параметров пленочных элементов – резисторов и др., частоты кварцевых резонаторов.



4. Аналоговая и цифровая оптическая запись
· Декоративная обработка поверхностей различных материалов - стекла, керамик, камней
5. Микромаркировка различных материалов



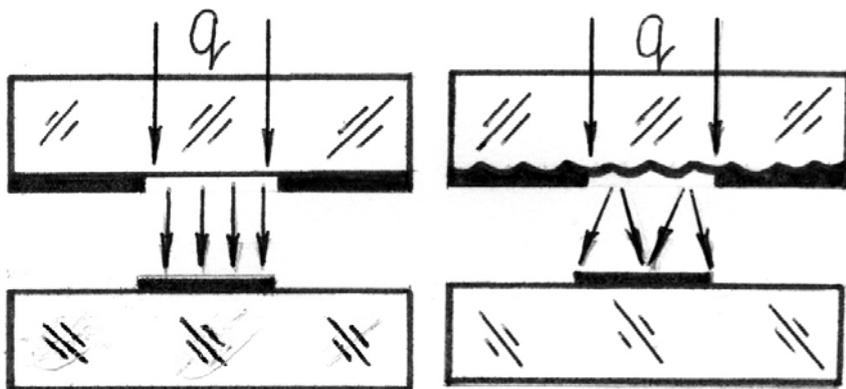
Изображение, полученное путем осаждения хрома на подложку стекла (N_2 -лазер, метод LIFT, сканирующая техника).

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕНОСА ПЛЕНОК И ИХ РЕШЕНИЯ

1. Проблема переиспарения и адгезии.

Решение:

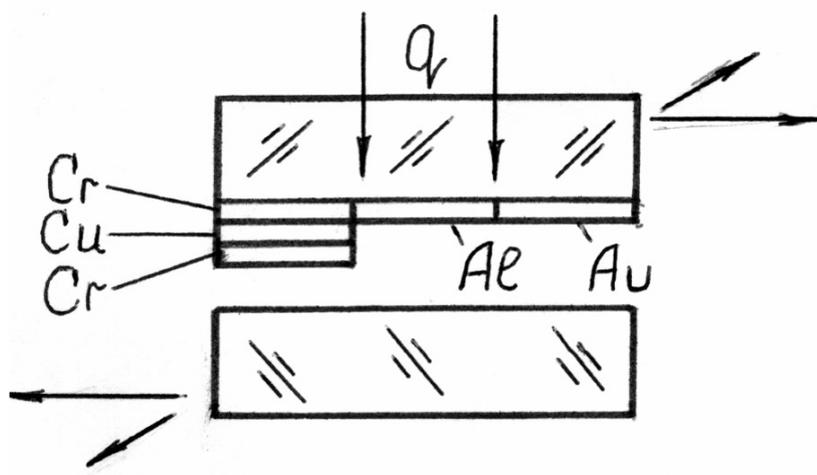
Донор с искусственной шероховатостью обеспечивает рассеяние света после испарения тонкой пленки и отжиг осажденной пленки.



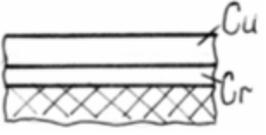
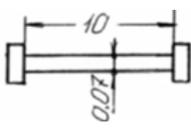
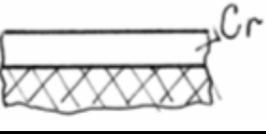
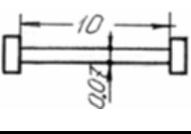
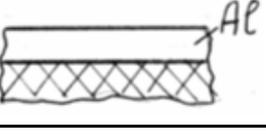
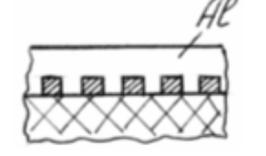
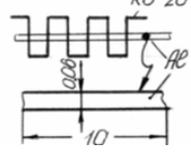
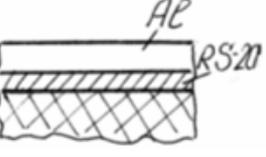
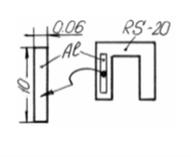
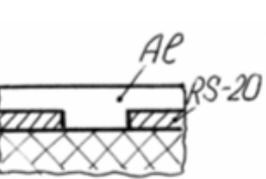
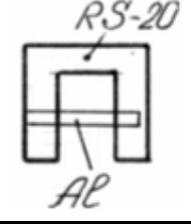
2. Проблема достаточной толщины пленки при переносе многослойных покрытий.

Решение:

Отдельное посекционное перемещение многослойного донора.



НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДА LIFT

Номер образца	Донор		Акцептор			
	Структура	Толщина, мкм	Размеры, мм	Число осажденных слоев	Сопротивление	
					До осаждения	После осаждения
1		0,4 0,08		8		40
2		0,4		8		
3		1		10	-	10
4, 5, 6		1		8	51000	10000
7		1		8	8000	5000
8		1		8	8000	6000

ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНИКИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК В СМЕЖНЫХ ОБЛАСТЯХ,

- оптическая память, аналоговая и цифровая запись информации (импульсный лазер, фокусирующая оптика, специальные режимы нагрева);
- микромаркировка (импульсный лазер, метод проекционной контактной оптики, режимы осаждения);
- печать (изображений, электрографические режимы записи символов);
- изготовление печатных форм ;
- декоративная обработка поверхностей различных материалов (камни, керамики, дерево, кожа, различные покрытия).



Изображение,
полученное путем
испарения Си покрытия
с диэлектрической подложки
(Nd-YAG лазер,
метод сканирования).

5. ПЕРСПЕКТИВЫ ЛОТП

5. 1. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

ТРЕБОВАНИЯ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ЛОТП В ПРОЦЕССАХ ЛИТОГРАФИИ

- увеличение точности воспроизведения размера элемента,
- увеличение точности воспроизведения формы элемента.

Для этого необходимо:

- исключить трещины и уменьшить термические напряжения в подложках и пленках,
- исключить последствия обработки в виде брызг и капель,
- уменьшить размеры валика (или исключить его),
- уменьшить влияние на подложку (фазовые переходы, структурные превращения)

ТРЕБОВАНИЯ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ЛОТП В ПРОЦЕССАХ ПОДГОНКИ

- увеличение стабильности параметров после подгонки,
- уменьшение потерь, шумов, снижения качества.

Для этого следует

- уменьшить размеры нагретых зон в пленках,
- исключить трещины и уменьшить термомеханические напряжения в подложке и пленке

ТРЕБОВАНИЯ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ЛОТП ПРИ ЗАПИСИ ИНФОРМАЦИИ

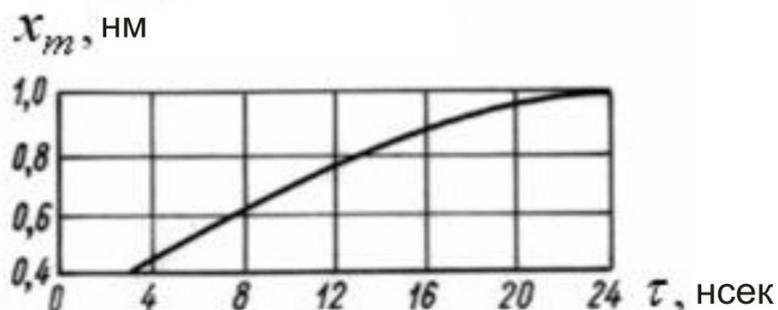
- увеличение чувствительности (уменьшение энергетических порогов записи) посредством улучшения материалов и использования процессов низко-пороговой записи,
- увеличение плотности записи (разрешения),
- снижения уровня шумов во время записи.

Для этого необходимо:

- увеличить воспроизводимость размеров элементов,
- увеличить воспроизводимость формы элементов,
- уменьшить размер валика

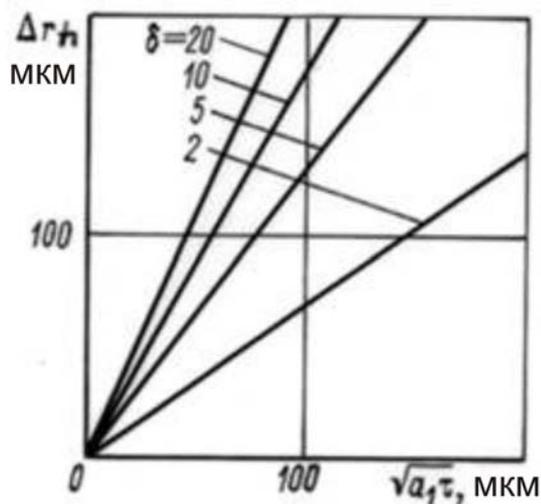
МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЛОТПИМПУЛЬСНОЕ ОБЛУЧЕНИЕ

1. При этом часть энергии, переданная подложке, уменьшается, следовательно уменьшается возможность образования трещин в подложке и толщина нагретых и расплавленных слоев.



Зависимость толщины расплавленного слоя от длительности импульса.

2. Уменьшаются пороговые энергии обработки пленки.
3. Уменьшаются размеры нагретых зон в пленке



Размер прогреваемого слоя в тонкой пленке при различном соотношении температуры на краю элемента и на границе прогреваемой зоны.

τ , нсек	Δr , мкм		
	Рекристаллизованные	Окисленные	Расплавленные
10	0.25	0.17	0.1
10	125	90	60

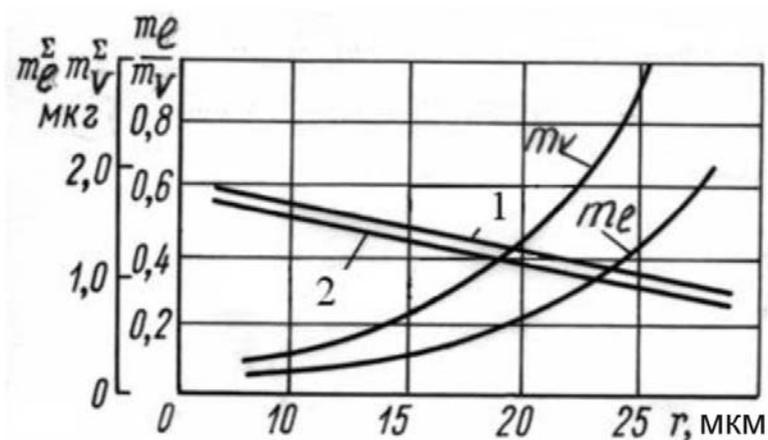
4. Различия между порогами разрушения различных элементов снижаются до субмикронных размеров.
5. Снижается нестабильность размеров элементов.
6. В режиме разрушения снижается число капель и брызг.

РАССМОТРЕНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ ПЛЕНОК

Выбор режима лазерной обработки:

1) без капель и брызг,	2) без капель и брызг,
без валика	с точной топологией,
(многоимпульсный процесс)-	с валиком по краям-
$q^{th} < q < q^d$	$V_v \geq \frac{h}{\tau} - \frac{h}{l} \left(\frac{\sigma\pi}{\rho^2 h \tau} \right)^{1/5}$

- Доля жидкой фазы уменьшается при:
- увеличении размера облученной зоны;
 - уменьшении толщины пленки;
 - облучении через прозрачную подложку (облучение задней стороны пленки)



Зависимость массы жидких и твердых продуктов разрушения и их соотношения от размера облученной зоны

(Ag, $h = 200$ нм,
 $q = 1,6 \cdot 10$ Вт/см²).

- 1 - экспериментальная
2 - вычисленная

ОПТИМАЛЬНЫЙ ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ПЛЕНКИ/ПОДЛОЖКИ

Для уменьшения термонапряжений и исключения трещин в подложке-	термостабильные материалы подложки
Для уменьшения термонапряжений и исключения трещин в толстых пленках-	оптимизация состава пленок (выбор материала подслоя)
Для улучшения параметров обработки-	понижение теплопроводности и диффузионной способности пленок, и их толщины
Для увеличения чувствительности при записи информации-	увеличение поглощения в пленки
Для снижения порога обработки и полного удаления пленки-	поглощающая подложка
6. Для лучшей сохранности подложки-	прозрачная подложка

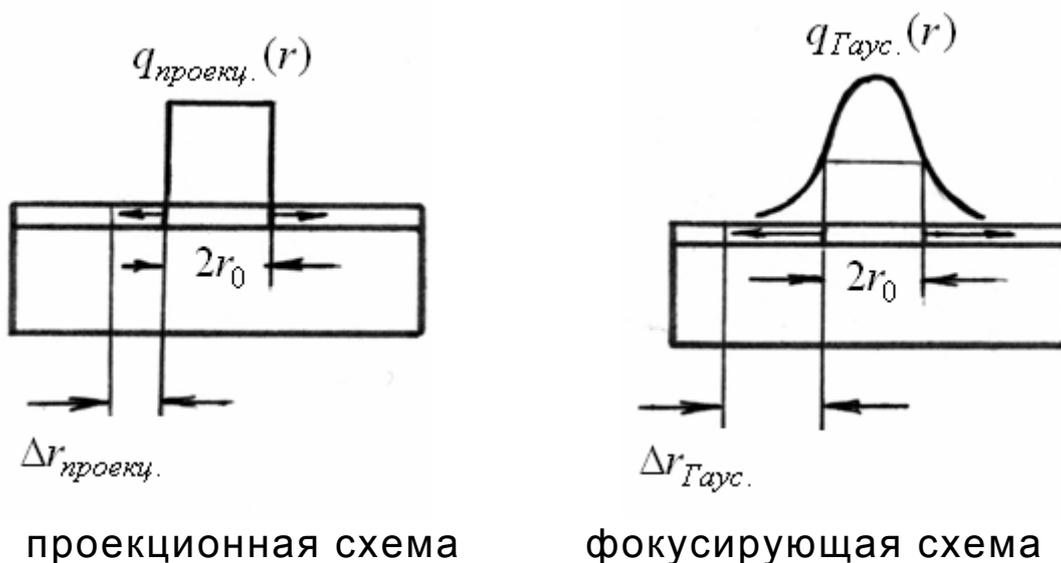
ВЫБОР МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

По присущим им искажениям
(для размера облученной зоны 10 мкм)

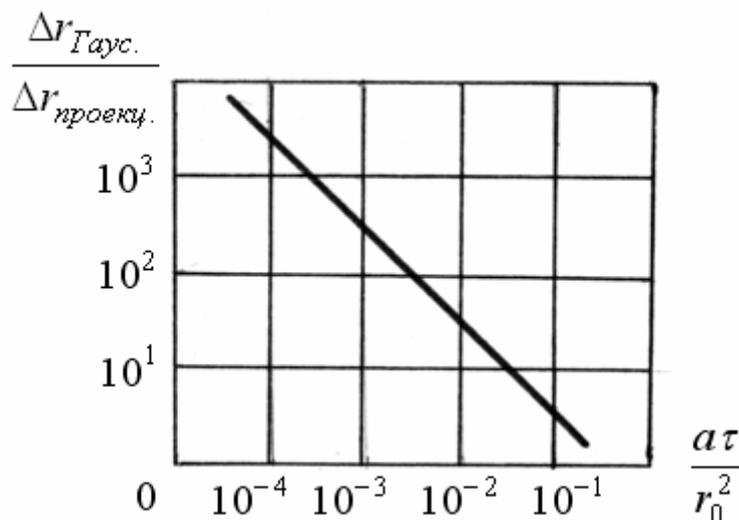
Искажения	Фокусирующий- сканирующий	Контурно- проекционный	Микро проекционный
-Точность формы	3	1	2
-Размер прогретой зо- ны	3	1	2
-Разрешение термического изображения	1	2	3
-Термические искажения размеров и формы	3	1	2
-Контраст границы	3	1	2
-Различия в порогах испа- рения больших и малых элементов	2	1	3
-Гидро- динамические искажения	2	3	1
-Дифрак- ционные иска- жения	1	2	3
-Аберрации	1	2	3
-Однородность	1	2	3
Количество баллов	20	16	24

5.2. ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПОДГОНКИ (1)

Применение проекционного метода дает возможность исключить облучение соседних участков крыльями гауссова распределения (что неизбежно при работе в фокальной плоскости) и существенно снизить размер зоны термовлияния.



$$\frac{\Delta r_G}{\Delta r_{PR}} = 0.35 \frac{r_0^2}{a\tau}$$



Проекционный метод обеспечивает существенное увеличение стабильности, уменьшение дрейфа параметров, размеров расплавленных, окисленных и термически обработанных зон, увеличение точности вычислений и предсказаний результатов процесса подгонки.

ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПОДГОНКИ (2)



Лазерная установка “Кварц–2” (ИТМО) для оперативной корректировки топологии, ретуши фотошаблонов и подстройки параметров электронных компонентов в цеху предприятия

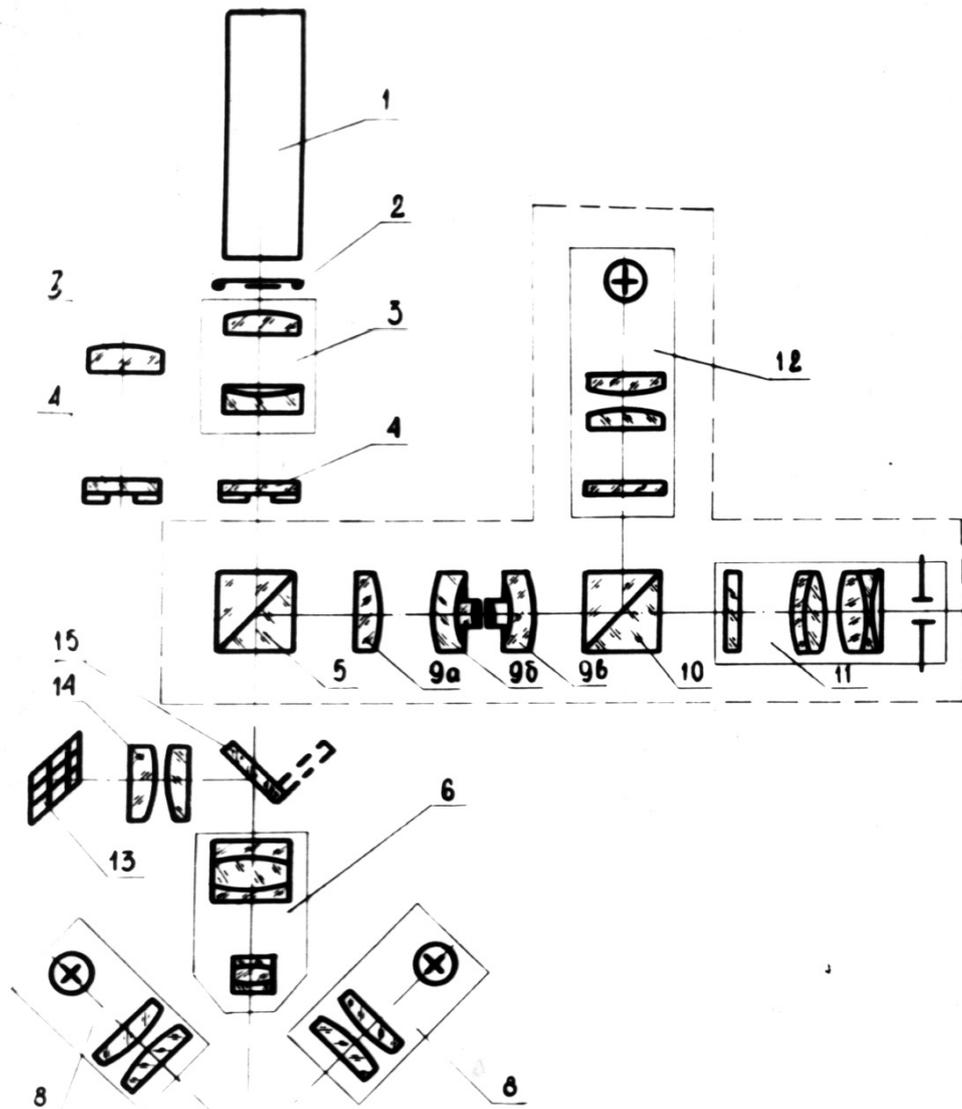
(1 — корпус с лазером; 2 — оптическая система; 3 — рабочий стол)

Основные параметры:

Длина волны	0.34 мкм
Импульсная мощность	3 кВт
Длительность импульса	10 нс
Частота повторения импульсов	10, 25, 50, 100 Гц
Увеличение оптического канала	100x
Диапазон перемещения рабочего стола	25 x 25 мм
Точность позиционирования	5 мкм
Габаритные размеры	500 x 700 x 1850 мм
Расход энергии	300 Вт

ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПОДГОНКИ (3)

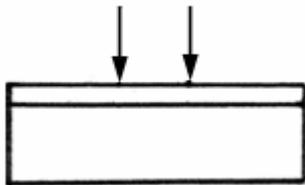
ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ “КВАРЦ-2” (КОНТУРНО-ПРОЕКЦИОННЫЙ МЕТОД)



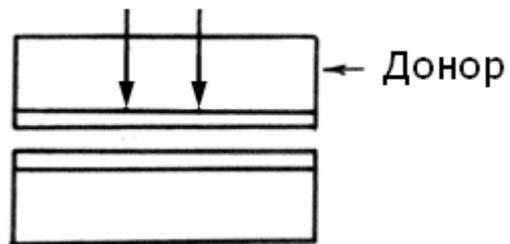
- 1–6 — энергетический канал, 1 — лазер, 2 — затвор,
3 — энергетическая система освещения маски,
4 — диафрагма, 5 — разделительная призма,
6 — микрообъектив, 8–15 — визуальный канал,
8 — подсветка объекта, 9 — корректирующая оптическая
система, 10, 15 — разделительные элементы, 11 — окуляр,
12 — автоколлимационный окуляр,
13, 14 — системы имитации проекционной диафрагмы,
13 — матрица светодиодов, 14 — конденсор.

5.3. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ЛОКАЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЕРЕНОСА ПЛЕНОК (LIFT)

1. Создание оборудования, объединяющего возможности удаления и нанесения пленочных элементов
(те же физические режимы лазерного излучения q , Вт/см²; τ , с)



Первая позиция —
процессы удаления



Вторая позиция —
процессы осаждения

2. Расширение области применения:

– осаждение сложных пленок – полупроводников (фотополупроводники PbS, PbSe и др.), высокотемпературных сверхпроводящих пленок и т.д.

3. Распространение методов LIFT на другие технологические процессы (изготовление Li батарей и т.д.)

4. Ионная лазерная имплантация

5. Скрайбирование

6. Развитие переноса структурно-чувствительных и биологических материалов (MAPLE-LIFT)

5.4. ОБЪЕДИНЕНИЕ АКТИВАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИХ ЛОКАЛИЗАЦИЕЙ (1)

Лазерная микрохимия является одним из наиболее универсальных из всех технологий лазерной микроэлектроники. Ее использование все более эффективно и многообещающе, так как оно объединяет лазерную литографию с основными технологическими процессами, такими как распыление, легирование, синтез новых материалов, окисление и травление в единый технологический цикл; более того, все эти процессы могут быть иницированы в области субмикронных размеров. Особенно привлекательной чертой лазерной микрохимии является возможность реализации «холодной» обработки материалов – важнейшей концепции в производстве интегральных схем со сверхбольшой степенью интеграции.

В том числе, это следующие процессы:

-локальный лазерный термо-активированный синтез соединений и сплавов Pd_2Si , PtSi , MoSi_2 , Wsi_2 , NbSi_2 , $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, AlSb , CdSe , CdTe , $\text{CdTe}_x\text{Se}_{1-x}$

-локальное, индуцированное лазером термическое разложение металло-органических соединений (МОК) $\text{Ni}[\text{Ni}(\text{CO})_4]$, $\text{W}[\text{W}(\text{CO})_6]$, $\text{Zn}[\text{Zn}(\text{CH}_3)_2]$, $\text{Cd}[\text{Cd}(\text{CH}_3)_2]$, $\text{Cr}[\text{Cr}(\text{CO})_6]$

-локальное лазерное разложение МОК в газовой фазе $\text{Cd}[\text{Cd}(\text{CH}_3)_2]$, $\text{Zn}[\text{Zn}(\text{CH}_3)_2]$, $\text{Sh}[\text{Sh}(\text{CH}_3)_4]$, $\text{Ga}[\text{Ga}(\text{CH}_3)_3]$, $\text{Si}[\text{Si}(\text{CH}_3)_4]$, $\text{Ge}[\text{Ge}(\text{CH}_3)_4]$, $\text{Al}[\text{Al}_2(\text{CH}_3)_4]$

-селективное лазерное фототравление – управляемое локальное удаление материалов при помощи лазерно-химической обработки: Si , Ge , GaAs , InP , CdS , SiO_2 , $\text{TiC-Al}_2\text{O}_3$.



Схема фото-активированной химической реакции разложения МОК в газовой фазе.

ОБЪЕДИНЕНИЕ АКТИВАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИХ ЛОКАЛИЗАЦИЕЙ (2)

ЛАЗЕРНАЯ ЛОКАЛЬНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ НА ПОДЛОЖКЕ АМОРФНОГО ДИЭЛЕКТРИКА

Предпосылки:

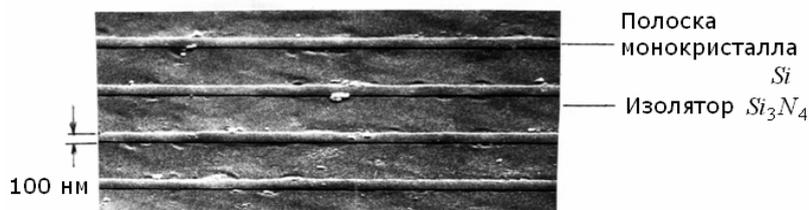
- возможность изготовления трехмерных вертикально-интегрированных схем;
- возможность создания микронэлектронных приборов большого размера, таких как дисплеи и датчики изображений.

Проблемы:

1. Появление поверхностных электромагнитных волн и периодических поверхностных структур.
2. Нелинейный процесс поглощения света, нагревания и кристаллизации полупроводников.
3. Узкая область оптимальной энергии, ограниченная плавлением кремния (снизу) и появлением капель (сверху).

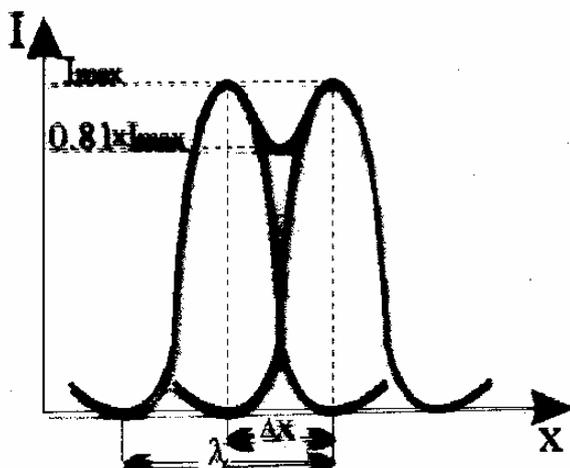
Решения:

1. Использование неполяризованного (естественно-поляризованного) света двухмодового Nd: YAG лазера при нормальном падении
2. Стабилизация мощности лазерного излучения
3. Использование специальных промежуточных слоев с меньшим поверхностным натяжением

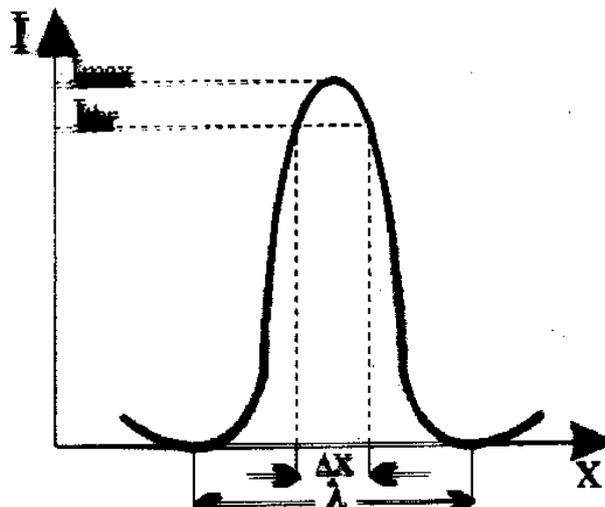


Фотография
локальной
лазерной
кристаллизации
поли-Si на слое изолятора
(YAG:Nd двух
модовый лазер с непре-
рывным излучением,
мощностью 20 Вт)

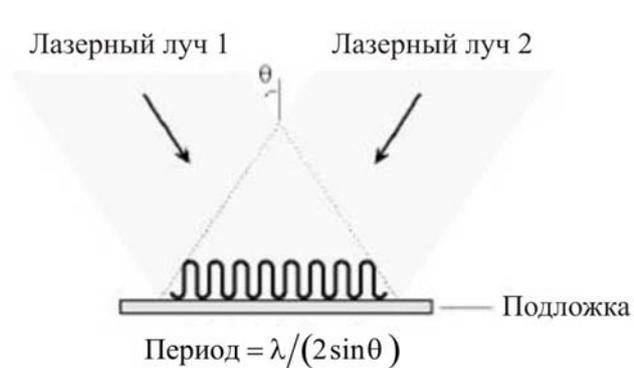
5.5. ПРЕОДОЛЕНИЕ ДИФРАКЦИОННОГО ПРЕДЕЛА В ЛОТП



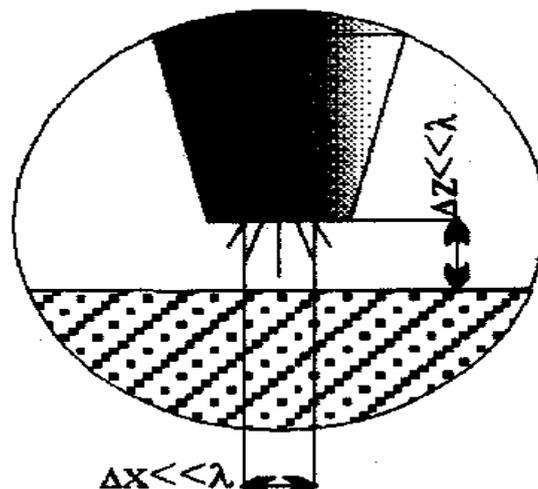
Дифракционный
предел в оптике



Пороговые процессы
в лазерных технологиях

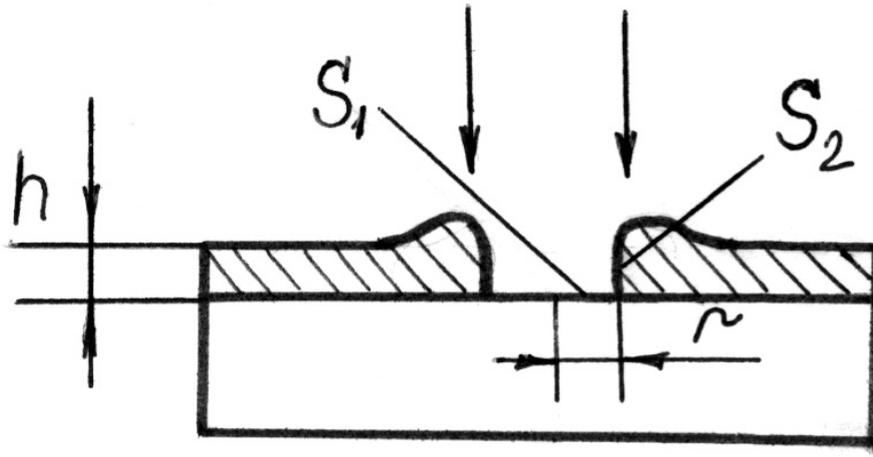


Многопучковая интерференция
лазерных пучков



Формирование изображений
в ближнепольной оптике

СУБМИКРОННАЯ ЛОТП



Минимальный r соответствует минимальной свободной энергии F :

$$F = \sigma_1 S_1 + \sigma_1 S_2 - \sigma_2 S_1 + \sigma_{12} S_1$$

- σ_1 — свободная энергия поверхности пленки
- σ_2 — свободная энергия поверхности подложки
- σ_{12} — свободная энергия границы пленка–подложка.

$$F = F_{\min} \text{ когда } \frac{dF}{dr} = 0$$

При этом условии:

$$r_{\min} = \sigma_1 h / (\sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_{12})$$

Для пленок с хорошей адгезией:

$$\boxed{r_{\min} = h}$$

Это значит, что теоретический предел разрешения лазерной литографии на тонких пленках намного больше, чем разрешение оптического изображения.

ВЫВОДЫ

**1. ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СТАЛИ НЕЗАМЕНИМЫМ И В
ВЫСШЕЙ СТЕПЕНИ ЭФФЕКТИВНЫМ СРЕДСТВОМ
ДЛЯ МИКРО- И НАНООБРАБОТКИ,
ОСОБЕННО В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ**

**2. ИНТЕГРАЦИЯ ЛАЗЕРНЫХ И ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ-ОСНОВНОЙ ПУТЬ ПОВЫШЕНИЯ ИХ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ВО ВСЕХ
ОБЛАСТЯХ ПРИЛОЖЕНИЯ**

**3. ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НАШЛИ ШИРОКИЙ КРУГ
ПРИМЕНЕНИЙ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ**

**4. РАЗВИТИЕ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВЕСЬМА ДАЛЕКО
ОТ НАСЫЩЕНИЯ И БЛИЖАЙШЕЕ ВРЕМЯ В ЭТОЙ
ОБЛАСТИ СЛЕДУЕТ ЖДАТЬ НОВЫХ БОЛЬШИХ
ПРОРЫВОВ!**

ЛИТЕРАТУРА

**В.П.Вейко, С.М.Метев.
Лазерные технологии
в микроэлектронике.
Издание БАН, София, 1991.**

Смотрите также книги на английском языке

**S.Metev, V.P.Veiko
“Laser–assisted microtechnology”,
Springer Verlag, N–Y, Heidelberg,
1998 (second edition).**

**R Sugioka, M. Meunier, A. Pique editors
Laser Precision Microfabrication
Springer Verlag, N–Y, Heidelberg,
2010**



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

КАФЕДРА ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Лазерные технологии не случайно называют технологиями XXI века. Открытые при нашей жизни лазеры уже сегодня широко проникли в промышленность, строительство, транспорт, связь, медицину, биологию, экологию, шоу–бизнес и другие сферы жизни. Лазерные принтеры, лазерные CD–диски, лазерные торговые сканеры и лазерные шоу сегодня известны всем. Менее известны широкой публике, но не менее важны лазерные технологии в микроэлектронике для нанесения и структурирования тонких пленок, для резки и сварки брони, закалки инструментальных сталей, декоративной обработки дерева, камня и кожи, при лечении болезней глаз, сосудов, опухолей, и т.д., а в ближайшей перспективе — для избавления человечества от очков и морщин (да, да — сотни операций по лазерной полировке роговицы глаза и кожи уже проведены), разработка реакций лазерного управляемого термоядерного синтеза и лазерных реактивных двигателей, создание трехмерных объектов за счет прямой трансформации виртуального (компьютерного) образа в материальный объект при взаимодействии лазерного излучения с веществом и многое, многое другое.

История кафедры ЛТ и ЭП делится на 4 разных периода:

Период I — с момента появления лаборатории лазерной технологии в ЛИТМО в 1965 г. до момента организации кафедры охраны труда и окружающей среды (ОТ и ОС) с отраслевой лабораторией лазерных технологий (ОЛЛТ) в 1982 г.

Период II — период развития кафедры ОТ и ОС и ОЛЛТ — 1982–1988 гг.

Период III — с момента создания на базе кафедры ОТ и ОС и ОЛЛТ кафедры лазерных технологий — 1988 г., в дальнейшем преобразованной в кафедру лазерных технологий и экологического приборостроения и по настоящее время.

Охарактеризуем периоды 1, 2 и 3 фактами.

1976 г. — научные работы ОЛЛТ по физическим основам лазерной обработки тонких пленок удостоены Премии Президиума АН СССР за лучшую научную работу в области «Фундаментальных проблем микроэлектроники».

1983, 1984 гг. — работы кафедры удостоены Премий Минвуза СССР за лучшую научную работу.

1986 г. — работы кафедры совместно с рядом других организаций удостоены Государственной Премии СССР.

1988 г. — кафедра ОТОС с лабораторией ЛТ по инициативе ректора ЛИТМО преобразована в выпускающую кафедру «Лазерных технологий» и начинается систематический выпуск специалистов по специальности 07.23 «лазерная техника и лазерные технологии».

1996 г. — кафедра ЛТ переименована в кафедру ЛТ и ЭП и осуществляет выпуск специалистов как лазерным технологиям, так и по специальности «инженер–педагог» со специализацией «экология».

С 2000 г. — лаборатория и кафедра ЛТ признаны Ведущей научной школой Российской Федерации по «Фундаментальным основам лазерных микротехнологий».

2001 – 2007 г. — этот статус ежегодно подтверждается.

2010 г –присуждение Премии Правительства Российской Федерации в области образования за «Создание системы подготовки специалистов высшей квалификации по

лазерным технологиям»

- За период времени с 1988 по 2010 г. кафедра выпустила более 400 специалистов в области лазерных технологий;
- За тот же период времени сотрудниками и аспирантами кафедры защищены 2 докторские и более 20 кандидатских диссертаций;
- По результатам работ кафедры издано 9 монографий;
- Результаты исследований сотрудников кафедры изложены более чем в 500 научных статьях и 50 патентах и авторских свидетельствах;

Период IV с 2008 г. и по настоящее время характеризуется тем, что университет явился победителем конкурса Правительства РФ 2006-2008г.г., проводимого в рамках приоритетного национального проекта «Образование» по отбору образовательных учреждений высшего профессионального образования, внедряющих инновационные образовательные программы.

При этом одним из направлений научно-образовательной деятельности Университета в рамках конкурса было выбрано направление «Лазерные технологии и системы», которое соответствует приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий в РФ и критическим технологиям РФ.

По результатам маркетинговых исследований ожидаемый рынок труда специалистов по данному направлению в Санкт-Петербурге составляет 300 чел. в год, по России — порядка 1500 человек.

Важнейшей составной частью проекта явилось создание новых научно-образовательных структур, центров и лабораторий, для оснащения которых были проведены закупки необходимого оборудования и приборов. Приведем информацию по данному разделу программы более подробно:

Создание новых лабораторий и центров.

1. Лаборатория лазерных нанотехнологий в составе 4–х научно–образовательных направлений, укомплектованных современным лазерным, измерительным и аналитическим оборудованием и финансируемых грантами РФФИ, РГНФ и Роснауки :

1) Лазерное формирование многофункциональных зондов (МЗ) для зондовой микроскопии с целью создания универсальных зондовых микроскопов.

Работа базируется на значительном заделе кафедры лазерных технологий и экологического приборостроения (далее ЛТ и ЭП) по лазерной вытяжке ближнепольных оптических зондов, нанокапилляров, многослойных зондов, кантилеверов и т.п.. Она проводится на базе 15 Вт квазинепрерывного ($f = 5$ кГц, $\tau = 1$ мкс CO_2 (Sinrad) лазера, специальной оптической системы облучения с торическим зеркалом и специализированных механических систем вытяжки с обратной электромеханической связью. Для контроля за процессом используется скоростная видеокамера AOS-x-motion (разрешение 1280×1024 , размер пиксела 12 мкм, максимальная скорость съемки 32000 кадр/сек), и быстродействующий микропирометр частичного излучения IFMO (спектральный диапазон $5.7\text{--}8.7$ мкм, температурный диапазон $200\text{--}2000^\circ\text{C}$, диаметр объекта $0.5\text{--}5$ мм, время отклика 0.1 с, точность ± 10 К), а для оценки результатов и разработки методик применения МЗ — зондовый микроскоп «Nanoeducator», НТ МДТ.

Работа проводится совместно с кафедрой нанотехнологий и материаловедения ИТМО (заведующий кафедрой — А.О.Голубок), имеющей большой опыт создания и применения зондовых микроскопов.

2) Исследование физических основ формирования А–К–А переходов в стеклокерамиках (А — аморфизованный, К — кристаллизованный слой) и способов управления их размерами, глубиной залегания, скоростью переключения и степенью кристаллизации.

Работа направлена на закрепление пионерского научного задела и на продвижение локальности А–К–А переходов в область наноразмеров, времен записи и переключения в область пико–и фемтосекунд, оптимизацию сред для объемной

оптической записи и поиск эффективных систем считывания информации.

Для реализации заложенных научных идей созданы стенды с пикосекундным лазером типа EXPLA PL 2143 ($\lambda = 266$ нм, 355 нм, 532 нм, 1060 нм, $W_{\text{имп}} = 30$ мДж, $\tau = 30$ пс, $f = 10$ Гц) и фемтосекундным лазером типа AVESTA (TiF-100-F4 $\lambda = 710$ -950 нм, $P_{\text{ср}} = 500$ мВт, $f = 90$ МГц, $\tau = 100$ фс), с 10) импульсными CO₂-лазерами ($\lambda = 10,6$ мкм) ТЕА-типа ($P_{\text{имп}} = 10^6$ Вт, $f = 500$ Гц, $\tau = 200$ нс) и щелевым ($P_{\text{ср}} = 150$ Вт, $f = 50$ -5000 Гц, $\tau = 30$ -500 мкс), позволяющими в максимальной степени реализовать потенциал работы.

Для контроля за процессом разработаны схемы, созданы и оснащены системы микрофотометрического контроля (микроскоп-спектрофотометр МСФУ-К (ОАО «ЛОМО»), увеличение – до 1000X, спектральный диапазон регистрации спектров: и оптической плотности 350-900 нм, минимальный размер фотометрируемого участка 1 мкм), микротепловизионного контроля (тепловизор FLIR-Titanium), спектральный диапазон 8-14 мкм, разрешение изображения 320 x 256, 14 бит, , максимальная частота обновления полных кадров 380 Гц скоростной видеографии (видеокамера AOS-x-motion) и др.

Работа проводится совместно с кафедрой оптоинформационных технологий и материалов (заведующий кафедрой — Н.В.Никоноров), обладающей большим опытом создания и исследования оптических материалов и всем комплексом необходимого термофизического, оптического и испытательного оборудования и приборов.

3) Наноструктурирование тонких металлических и полупроводниковых слоев.

Работа основана на обнаруженном в лаборатории кафедры ЛТ еще в 1967–70 гг. эффекте локального термохимического воздействия лазерного излучения и, в частности, на радикальном изменении растворимости Cr при его лазерном окислении. В последнее время этот эффект дополнен также «микроструктурным» воздействием лазерного излучения на структуру тонких слоев Cr, Si и, соответственно Cr₂O₃ и SiO₂.

Оба эффекта позволяют управлять топологией и другими параметрами структур.

Работа базируется на использовании коротких (N_2 -лазер, 0.337 мкм, 10 нс) и сверхкоротких импульсов (пикосекундный и фемтосекундный лазеры, упомянутые выше, эксимерный ArF лазер (CL-7020, $W_{\text{имп}} = 250$ мДж, $P_{\text{ср}} = 5$ Вт, $f = 20$ Гц, $\tau = 17$ нс) и коротких длин волн (193 нм, 226 нм, 337 нм, 355 нм) для повышения разрешающей способности метода и продвижения его в область нанометрических размеров вплоть до теоретического предела разрешающей способности (~толщины защитной окисной пленки). При ее проведении используются также указанные выше приборы и устройства — зондовый микроскоп, микротепловизор и целый ряд химических и термофизических методик.

Работа проводится в настоящее время совместно с группой д.ф-м.н. А.Г. Полещука из института автоматки и электрометрии Сибирского отделения РАН.

4) Управление микрогеометрией, наношероховатостью и физико-химическими свойствами поверхности материалов

В основе работы лежит эффект снижения шероховатости поверхности за счет лазерной абляции выступов. Этот эффект дополняется процессами гидродинамического затекания впадин, а также микроструктурирования, основанными на возникновении поверхностных электромагнитных волн и периодического рельефа и использовании других опто-физических явлений (интерференционных, ближнепольных и т.д.). Все изложенные методы и приемы позволяют создавать оптимальные параметры поверхностей (асферизация, полировка, структурирование) из стекла и пластмассы, металла и др. материалов.

В работе используются импульсные CO_2 -лазеры (ТЕА CO_2 и щелевой), эксимерный, пико- и фемтосекундные лазеры, специальные оптические системы, системы активного контроля профиля поверхности с обратной связью, зондовый микроскоп, микротепловизор.

Отдельное направление работ этого цикла — микро- и наноструктурирование поверхности кремния за счет

модификации структуры и лазерной абляции, а также управление свойствами окисла.

В настоящее время проводится также большой цикл работ по созданию рельефов для оптимизации антикоррозионных, антиобледенительных, биосовместимых и др. подобных свойств поверхности различных материалов.

2. Лаборатория лазерной очистки и реставрации произведений культуры и искусства (ПКИН) организована совместно с фирмой ООО «Мобильные лазерные системы».

В лаборатории имеются 3 установки.

1. Лазерный комплекс очистки и реставрации ЛИК-1 на базе 200 Вт, 20 нс Nd-YAG импульсного лазера и 6-ти координатного робота (максимальный рабочий радиус (размах) 1300 мм, точность при повторении позиции ± 0.08 мм) с полной системой ориентации, управления позиционированием волоконно-оптической головки. Работает в режимах очистки металлических изделий сложной формы от загрязнений, оксидных пленок и т.п., подготовки под сварку, сварки и модификации поверхности с системой сбора продуктов очистки для производства работ в лабораториях и в условиях музейных интерьеров.

2. Мобильный лазерный комплекс МЛС2 на основе 50 Вт импульсного Yt-Er лазера с волоконным выводом и миниатюрной оптической головкой для очистки; может быть установлен на автономную передвижную платформу с дистанционным управлением, например, для очистки поверхностей от радиоактивных загрязнений.

3. Переносной ранцевый лазерный комплекс ЛИК-2 на основе 20 Вт импульсного Yt-Er лазера с волоконным выводом и оптической системой, миниатюрной системой сканирования поверхности и встроенной системой отсоса продуктов очистки.

Все изложенные лазерные системы опробованы при исследованиях и разработке следующих процессов лазерной очистки:

1) лазерная очистка радиоактивно-загрязненных поверхностей,

2) лазерная очистка теплообменников и др. элементов энергетического оборудования,

3) лазерная очистка и подготовка поверхности под лазерную сварку и консервацию,

4) лазерная очистка краскопечатающих (флексографических) валов для полиграфии,

5) лазерная очистка металлических поверхностей предметов культурно–исторического наследия, городской скульптуры и декора.

В настоящее время разрабатываются физико–химические основы процессов лазерной очистки неметаллических поверхностей (мрамора и др. минералов), а также процессов реставрации стеклянных и стеклокерамических изделий (смальты, финифти, стеклянных и керамических мозаик и т.п.), фресок, стен и памятников от граффити и т.п.

3. Учебно–производственный центр лазерных технологий резки, сварки, наплавки и термообработки создан совместно с фирмой ООО «СП Лазертех» на базе мощных иттербиевых волоконных лазеров ЛС–0.5 (кВт), ЛС– 2 (кВт) или ЛС– 5 (кВт) (IPG-Photonics, Россия, г.Фрязино).

Лазерный комплекс для трехмерного раскроя деталей ЛУВР-1 на основе волоконного лазера с мощностью 5,0 кВт и выходным волоконным кабелем ($\lambda = 1,07$) включает универсальный 6–ти координатный робот FA06E (KAWASAKI) с системой ориентации и позиционирования, и полный комплект остального оборудования (холодильная машина, система управления роботом (контроллер D40), система подготовки и подачи технологических газов, фирмы Precitec), система дистанционного видеонаблюдения за техпроцессом, и т.д.

Там же установлен Лазерный комплекс «Trotec Professional 1313» предназначенный для прецизионной резки и гравировки неметаллов. Комплекс включает CO₂ лазер мощностью 50 Вт, механизм сканирования типа «летающая оптика». Максимальная скорость лазерной гравировки 1 м/с, максимальная площадь обрабатываемой поверхности

1300x1300 мм, программное разрешение 2 мкм, точность позиционирования ± 15 мкм).

Установка Trotec Professional TP 1313 применяется в следующих процессах: рекламном бизнесе, резке промышленных изделий из листовых неметаллических материалов, изготовлении вырубных штампов, трафаретов, лекал, текстильных изделий, изготовлении печатей и штампов. Центр предназначен для подготовки специалистов современного уровня и разработки новых лазерных технологий в основном на базе волоконных технологических лазеров.

Для организации учебного процесса задействуется также современное производственное оборудование предприятий ООО «СП «Лазертех», ООО «Лазерный центр», ООО «Мобильные лазерные системы»:

– Лазерные технологические комплексы типа «Хебр» (СО₂-лазеры мощностью 1-квт с порталными столами) для резки листовых металлических и неметаллических материалов, труб, сварка.

– Лазерные технологические комплексы типа «Trumatic» (СО₂-лазеры мощностью до 2,5 квт с порталными столами) для резки листовых металлических материалов.

– Модернизированный лазерный технологический комплекс типа «Хебр» с иттербиевым волоконным лазером ЛС-2 для резки и сварки, в т.ч сплавов цветных металлов.

– Минимаркер М 10 с иттербиевым импульсным волоконным лазером для прецизионной маркировки.

– Установка «Бетамарк 2000» (лазер Nd-YAG с ламповой накачкой и модуляцией добротности) для прецизионной маркировки.

– Установка ТЕГРА – 500 (лазер Nd-YAG с ламповой накачкой) для резки цветных металлов и их сплавов.

– Специализированные лазерные комплексы со столами АП-400 (лазеры Nd-YAG с ламповой накачкой).

Таким образом, выполнение поставленных перед инновационно-образовательной программой (ИОП) в рамках направления «Лазерные технологии и системы» позволило создать новый научно-учебный инновационный центр в СПбГУ ИТМО, оснащенный уникальным современным лазерным и измерительным оборудованием, способным реализовать

подготовку высококвалифицированных научных кадров в области лазерных технологий и проводить исследования на самом высоком научном уровне.

Одним из недавних результатов выполнения ИОП является завоевание Университетом (в лице кафедры лазерных технологий) совместно с указанными выше организациями нескольких наград на **Международной выставке–конгрессе «Высокие технологии, инновации, инвестиции»**: Диплома I степени за создание лазерного комплекса для трехмерной обработки материалов на базе волоконного лазера, Диплома II степени за создание учебно–производственного центра «Лазерные технологии», Диплома II степени за разработку переносной лазерной установки для очистки материалов от различных поверхностных загрязнений, Диплома II степени за разработку ранцевого устройства для лазерной очистки с вручением 1 золотой и 3–х серебряных медалей.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ КАФЕДРЫ

1. Лазерная обработка пленочных элементов, в том числе

- наноструктурирование тонких металлических и полупроводниковых слоев,

- лазерное локальное осаждение тонких пленок.

2. Исследование физических основ формирования А–К–А переходов в стеклокерамиках (А — аморфизация, К — кристаллизация) и способов управления их размерами, глубиной их залегания, скоростью переключения и степенью кристаллизации.

3. Создание новых оптических материалов и элементов микро– и нанофотоники на базе лазерных технологий.

4. Лазерное формирование многофункциональных зондов для зондовой микроскопии с целью создания универсальных зондовых микроскопов.

5. Лазерное управление микрогеометрией и физико–химическими свойствами поверхности.

6. Физико-химические основы лазерной очистки в промышленности и при реставрации произведений культурно–исторического наследия.

7. Исследование воздействия пико– и фемтосекундных импульсов лазерного излучения на вещество.

8. Фундаментальные исследования в области взаимодействия лазерного излучения с веществом: лазерная абляция и конденсация металлических и композиционных пленок и эффекты самоорганизации.

9. Физико–математическое моделирование в задачах дистанционного лазерного зондирования морской среды.

Заведует кафедрой лазерных технологий и экологического приборостроения Заслуженный деятель науки России, Лауреат Государственной Премии СССР, Лауреат Премии Правительства РФ, действительный член Академии Инженерных Наук РФ, д.т.н., профессор В.П.Вейко. Среди преподавателей кафедры Почетный работник высшей школы, Лауреат Премии Правительства РФ, д.т.н., профессор Е.Б.Яковлев, д.т.н., профессор Е.А.Шахно, Почетный работник высшей школы, к.ф.–м.н., доцент Г.Д.Шандыбина, к.т.н., доцент В.В.Барановский, к.ф.–м.н., доц. Ю.И.Копилевич, к.ф.–м.н., доцент А.Н.Проценко, молодые преподаватели, к.т.н., доц. А.А.Петров, к.т.н., доц. Н.Н.Марковкина, к.т.н., асс. Б.Ю.Новиков.

Работа кафедры проводится в тесном контакте с ведущими предприятиями Санкт–Петербурга по лазерным технологиям: ООО СП «Лазертех» (ген. директор С.Н.Смирнов), ООО «Лазерный центр» (ген. директор С.Г.Горный), ООО «Мобильные лазерные системы» (ген. директор В.Н.Смирнов). Кафедра также активно сотрудничает с университетами и институтами США (Princeton University, University of Arizona), Германии (BIAS, FHS Emden), Японии (RIKEN), Китая (HUST), Франции (ENISE), Италии (Lecce University) и др.

Вадим Павлович Вейко

Лазерные микро– и нанотехнологии
в микроэлектронике

Опорный конспект лекций

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел НИУ ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Подписано к печати

Заказ №

Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе