

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный
исследовательский университет»

Физический факультет

Стыковка чипа фотонной интегральной схемы и волоконного световода

Исполнитель:
аспирант П.В. Карнаушкин

Научный руководитель:
Зав. кафедрой радиоэлектроники и защиты
информации, к.ф.-м.н.
И.В. Лунегов

Научный консультант:
доцент кафедры физики
твердого тела, к.ф.-м.н.
Р.С. Пономарев

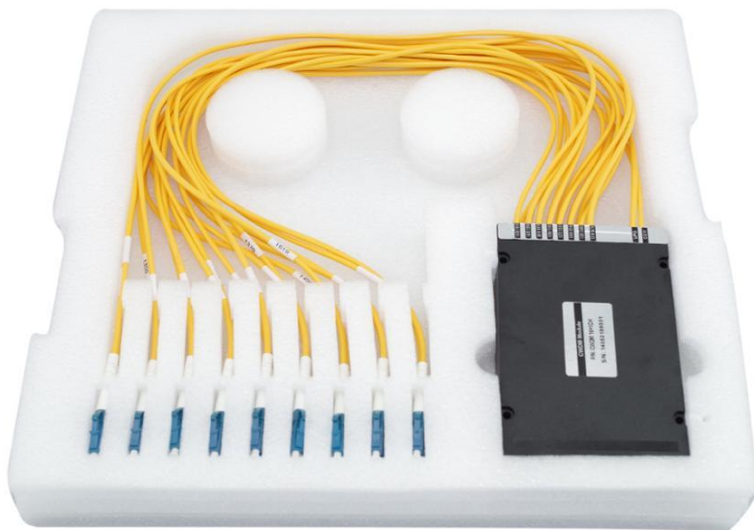
Пермь 2018

Направления деятельности

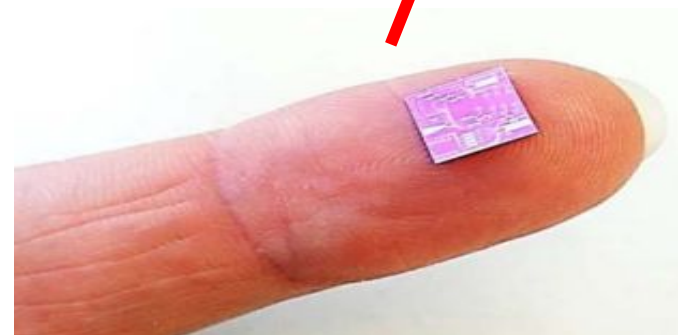
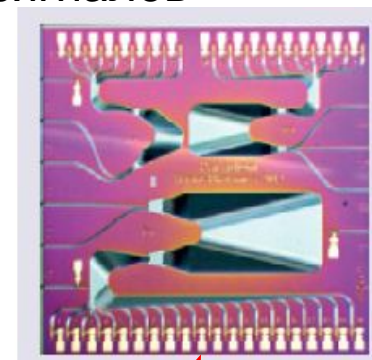
- 1. Оптическая стыковка**
 - Разработка систем по серийной оптической стыковке
 - Разработка способов оптической стыковки
- 2. Волоконные линзы**
3. Корпусирование интегрально-оптических модуляторов СВЧ диапазона
4. СВЧ фотодиоды с волоконным выводом (2.5 Gbps, 10 Gbps)
5. Разработка интегрально-оптического гибридного микроскопического сенсора угловой скорости
6. Совершенствование алгоритмов управления волоконно-оптических гироскопов
7. Фотополимерная 3Д печать

Что такое фотонная интегральная схема (ФИС) на примере волоконно-оптического мультиплексора...

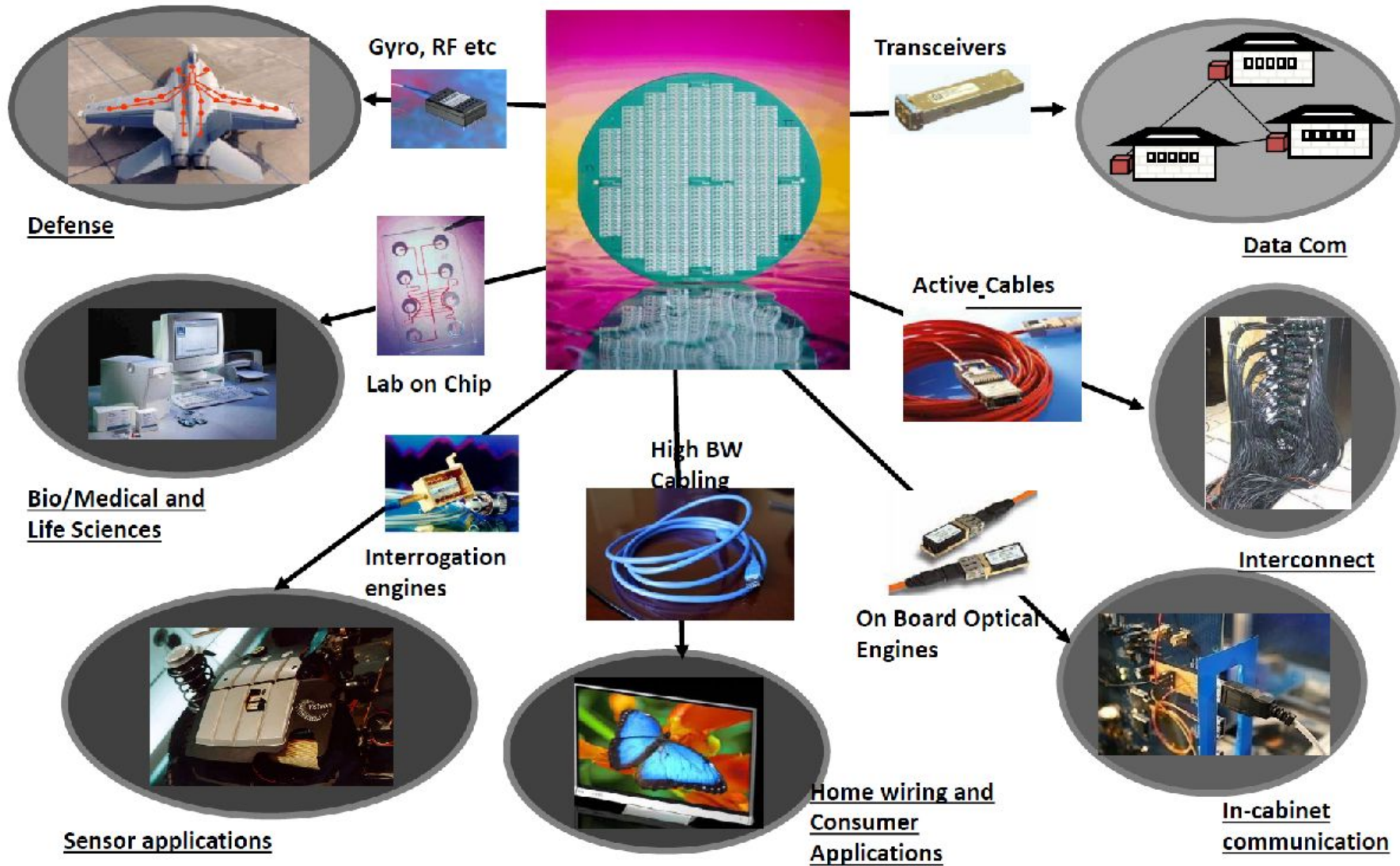
Фотонная интегральная схема – многофункциональная оптическая микросхема, состоящая из множества оптически связанных между собой компонентов, изготовленных на одной подложке и совместно выполняющих разнообразные функции обработки и передачи оптических сигналов



Волоконно-оптический мультиплексор

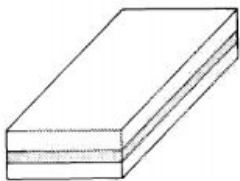


Применение

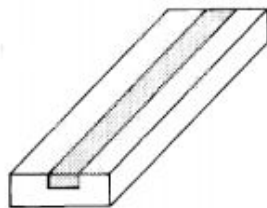


Классификация оптических волноводов

1)



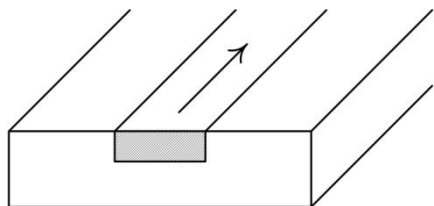
Планарный – ограничен в одном направлении



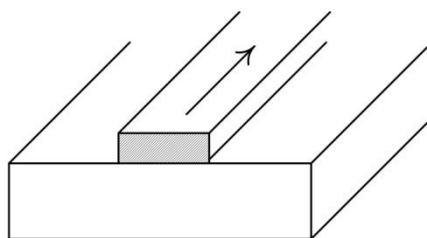
Канальный – ограничен в двух направлениях

Способность каналировать электромагнитную энергию оптического диапазона

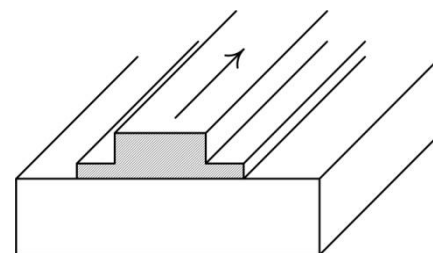
2)



Внедренный

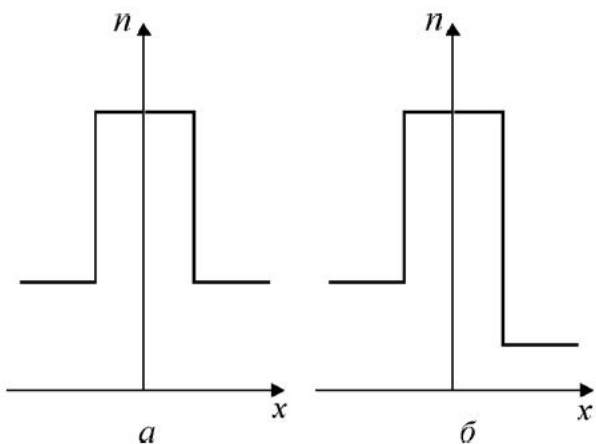


Приподнятый

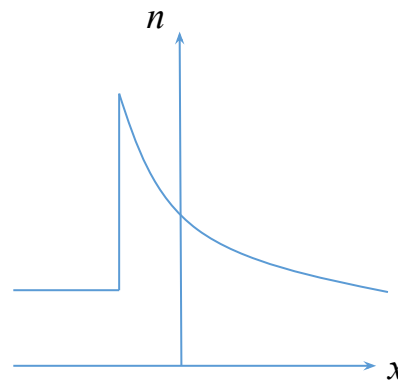


Гребенчатый

3)

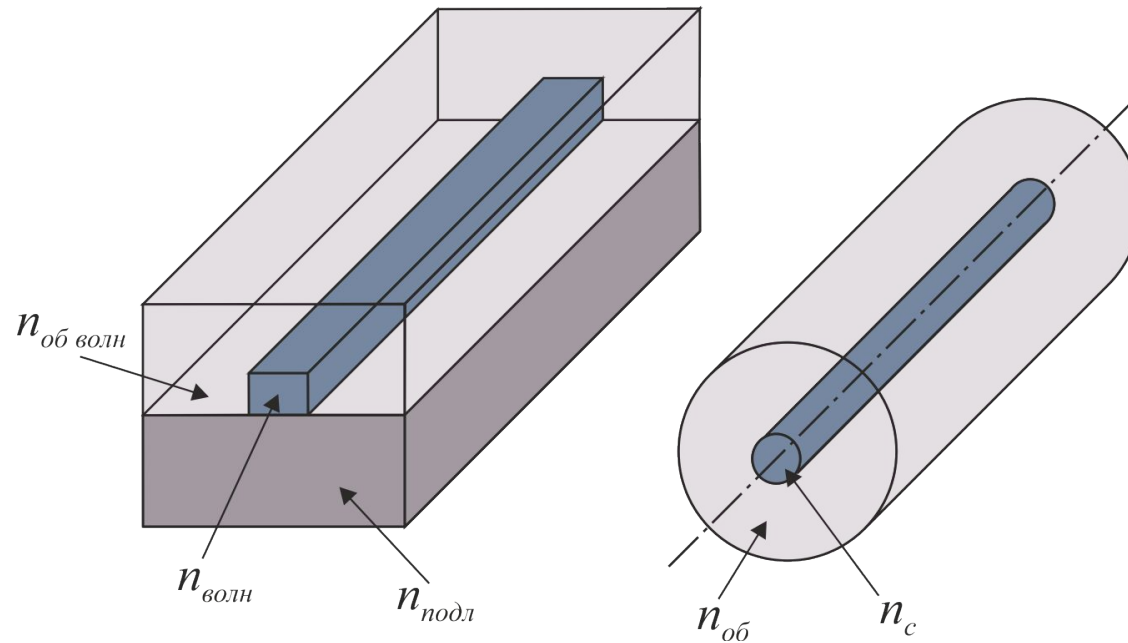


Ступенчатый профиль показателя преломления: а) симметричный; б) несимметричный



Градиентный профиль показателя преломления

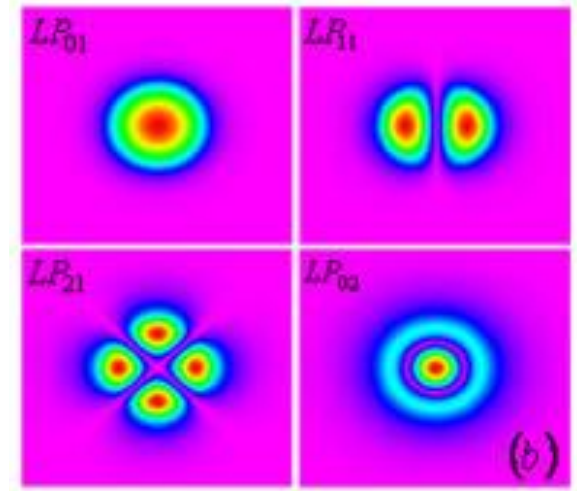
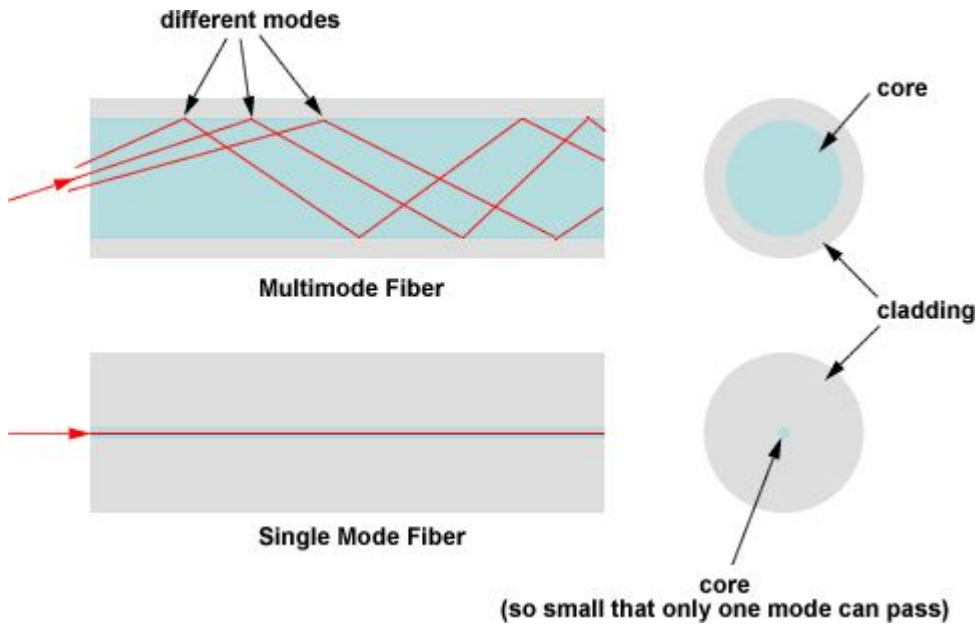
Классификация оптических волноводов



$n_{об\ волн}$, $n_{волн}$ и $n_{подл}$ – показатели преломления оболочки, волновода и подложки; $n_{об}$ и n_c – показатели преломления оболочки и сердцевины ВС.

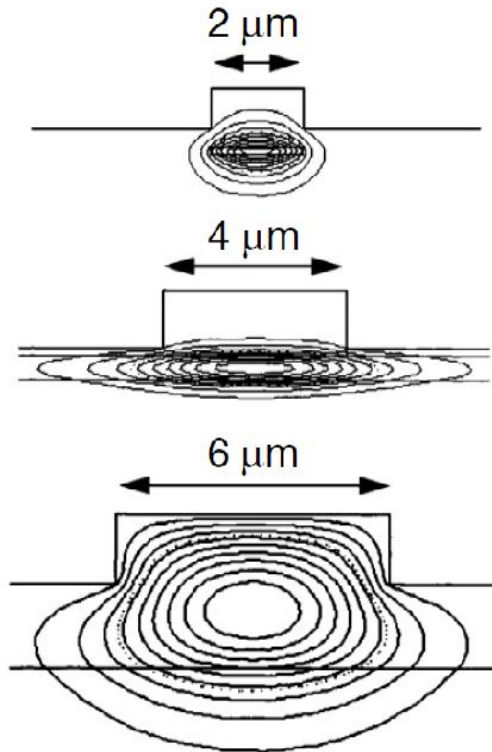
Распределение показателя преломления в волноводе и в волоконном световоде

Одномодовый и многомодовый режимы работы

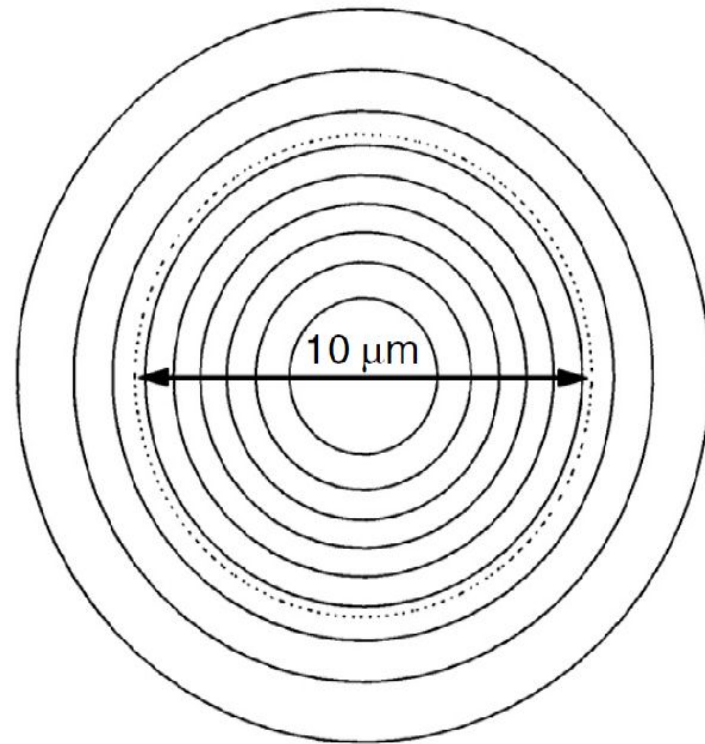


Распределение поля моды в волноводе

Профиль амплитуды моды волновода

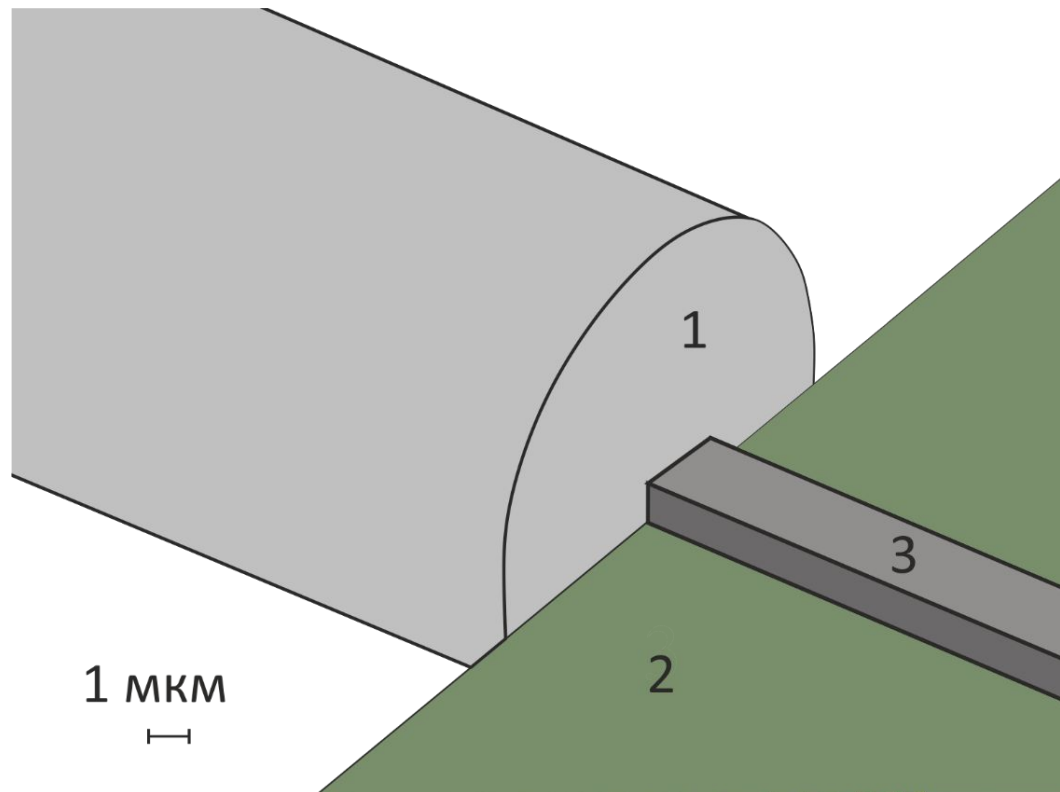


Профиль амплитуды моды волоконного световода



[R.A. Boudreau, S.M. Boudreau. Passive micro-optical alignment methods. Taylor and Francis group. 2005. P. 106]

Соединение волновода и волоконного световода



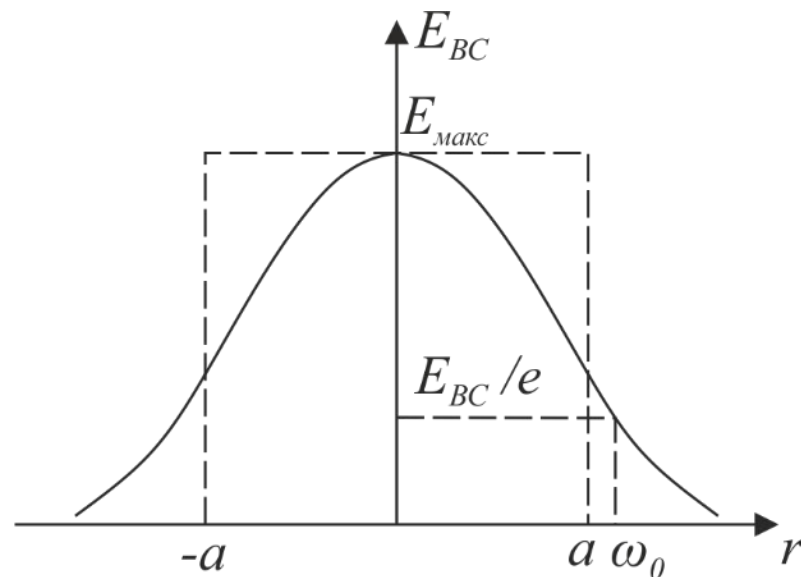
1 – сердцевина волоконного световода (ВС), 2 – подложка фотонной интегральной схемы (ФИС), 3 – волновод ФИС.

Проблема соединения ВС и волновода малого диаметра

Интеграл перекрытия полей волновода и волоконного световода

Для оценки потерь при соединении волоконного световода и волновода, необходимо рассчитать интеграл перекрытия электрических полей моды волоконного световода E_{BC} и моды волновода $E_{волн}$:

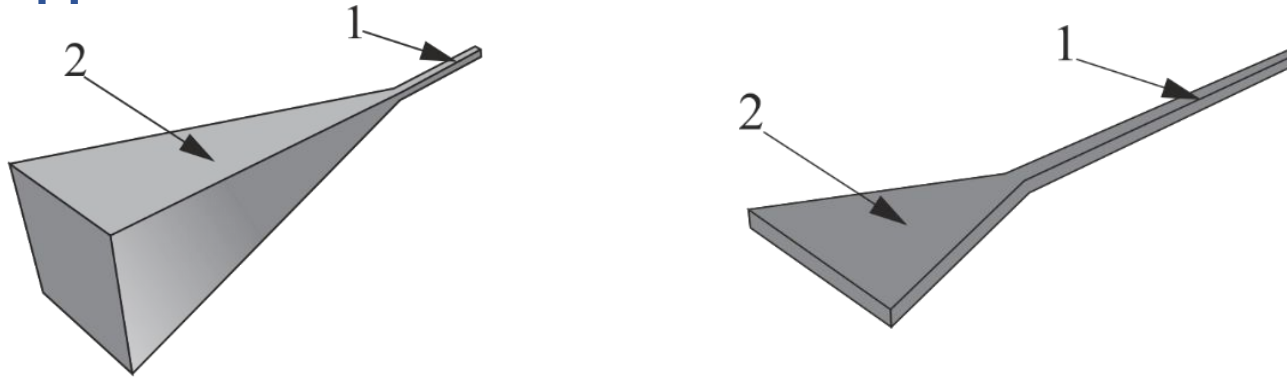
$$C = \left(\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E_{волн}(x, y, z)| |E_{BC}(x, y, z)| dx dy}{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E_{волн}(x, y, z)|^2 dx dy \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E_{BC}(x, y, z)|^2 dx dy}} \right)^2$$



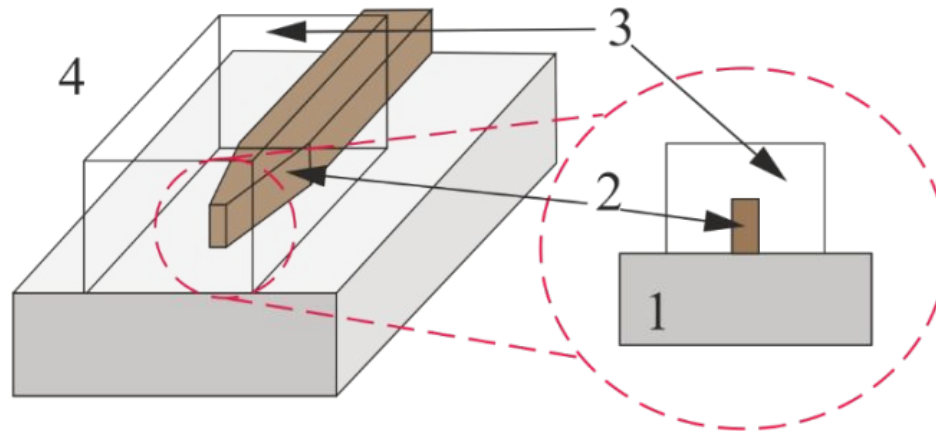
$$|E_{BC}(x, y, z)| = E_{макс} \cdot e^{-\left(\frac{x^2+y^2}{\omega_0^2}\right)}$$

где $E_{макс}$ – максимальное значение напряженности электрического поля, ω_0 – расстояние между точкой максимальной напряженности и точкой, где амплитуда падает в e раз.

Способы согласования модовых полей волновода и световода



1 – волновод ФИС, 2 – рупорный волновод.



1 – подложка из SiO_2 , 2 – двухмерный инвертированный рупорный волновод из Si, 3 – полимерный окружающий волновод, 4 – воздух.

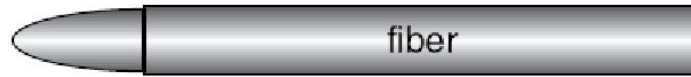
Двухмерный инвертированный рупорный волновод, сформированный в ФИС на базе SOI

Способы согласования модовых полей волновода и световода

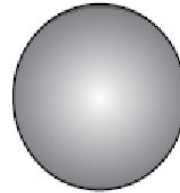
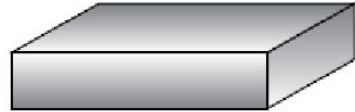
Видео

SOI Taper Simulated in Lumerical MODE Solutions'
Propagator

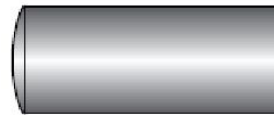
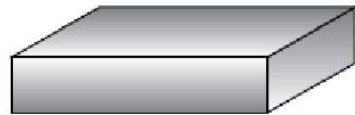
Способы согласования модовых полей волновода и световода



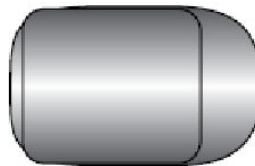
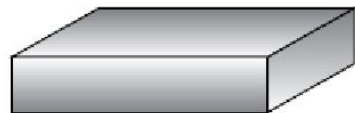
Lensed fiber



Ball lens

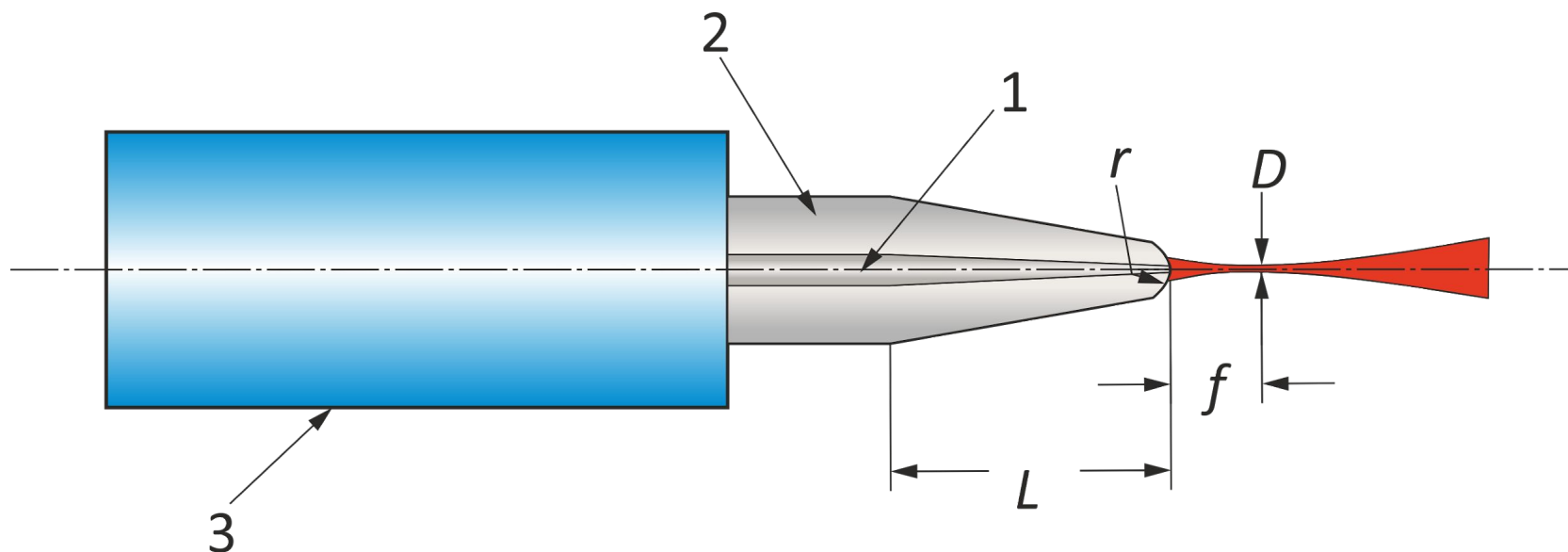


Grin lens



Aspheric lens

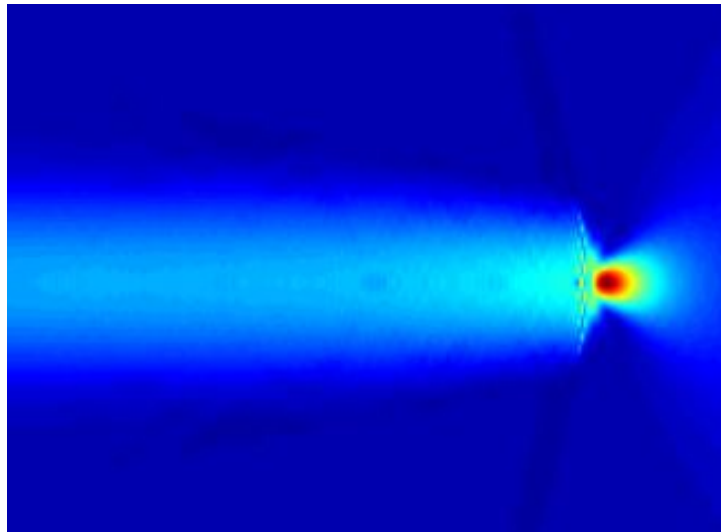
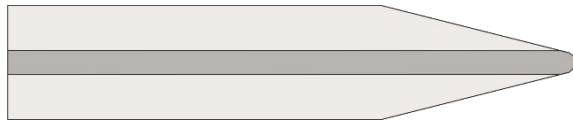
Способы согласования модовых полей волновода и световода



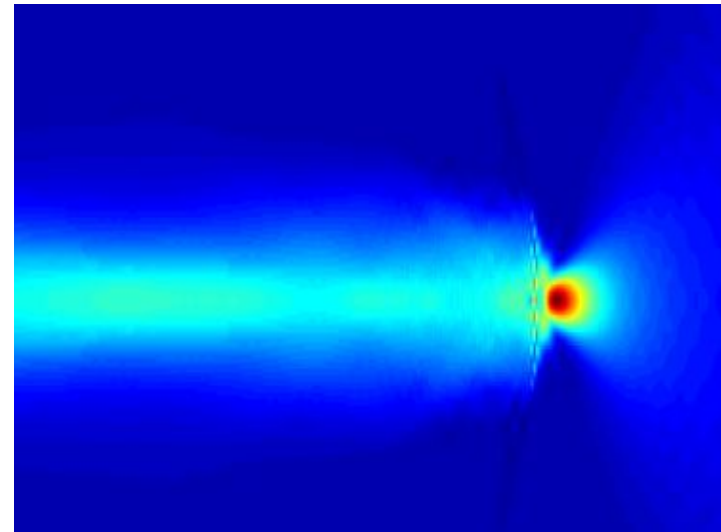
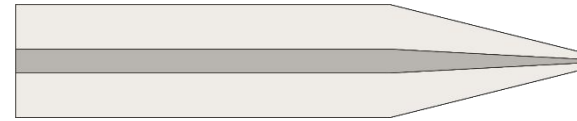
1 – сердцевина, 2 – оболочка, 3 – защитно-упрочняющее покрытие, L – длина конусного участка, r – радиус кривизны линзы, f – фокусное расстояние, D – диаметр поля моды (ДПМ).

Схема волоконного световода с конусной линзой

Способы согласования модовых полей волновода и световода



(a)

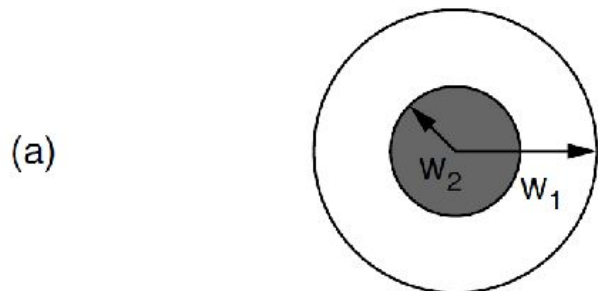


(б)

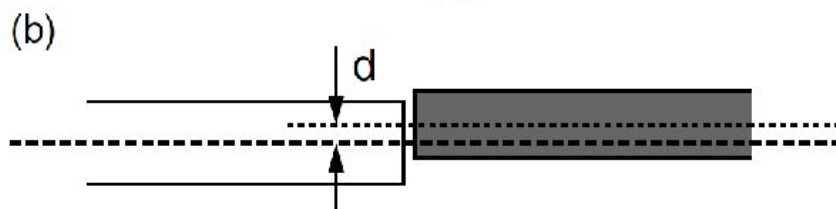
Распределения значений вектора Пойнтинга, полученные в результате моделирования в OptiFDTD.

а) линзованный ВС с конусной оболочкой, б) линзованный ВС с конусной сердцевиной

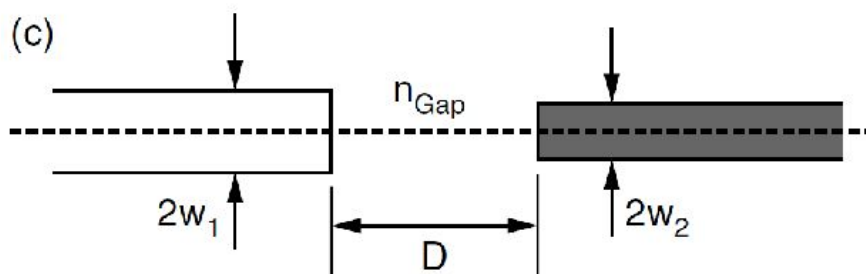
Источники потерь при соединении световодов



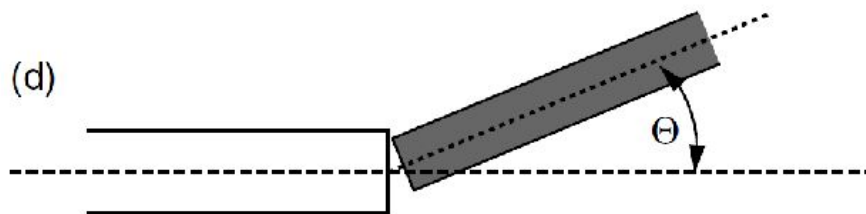
$$T = \left[\frac{2w_1 w_2}{w_1^2 + w_2^2} \right]^2$$



$$T = \left[\frac{2w_1 w_2}{w_1^2 + w_2^2} \right]^2 \exp - \left[\frac{2d^2}{w_1^2 + w_2^2} \right]$$



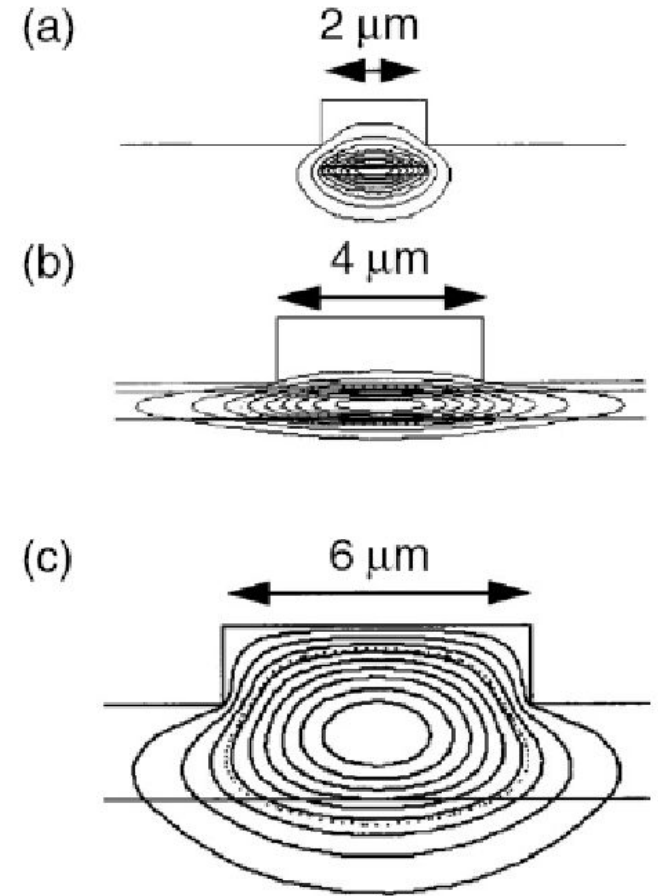
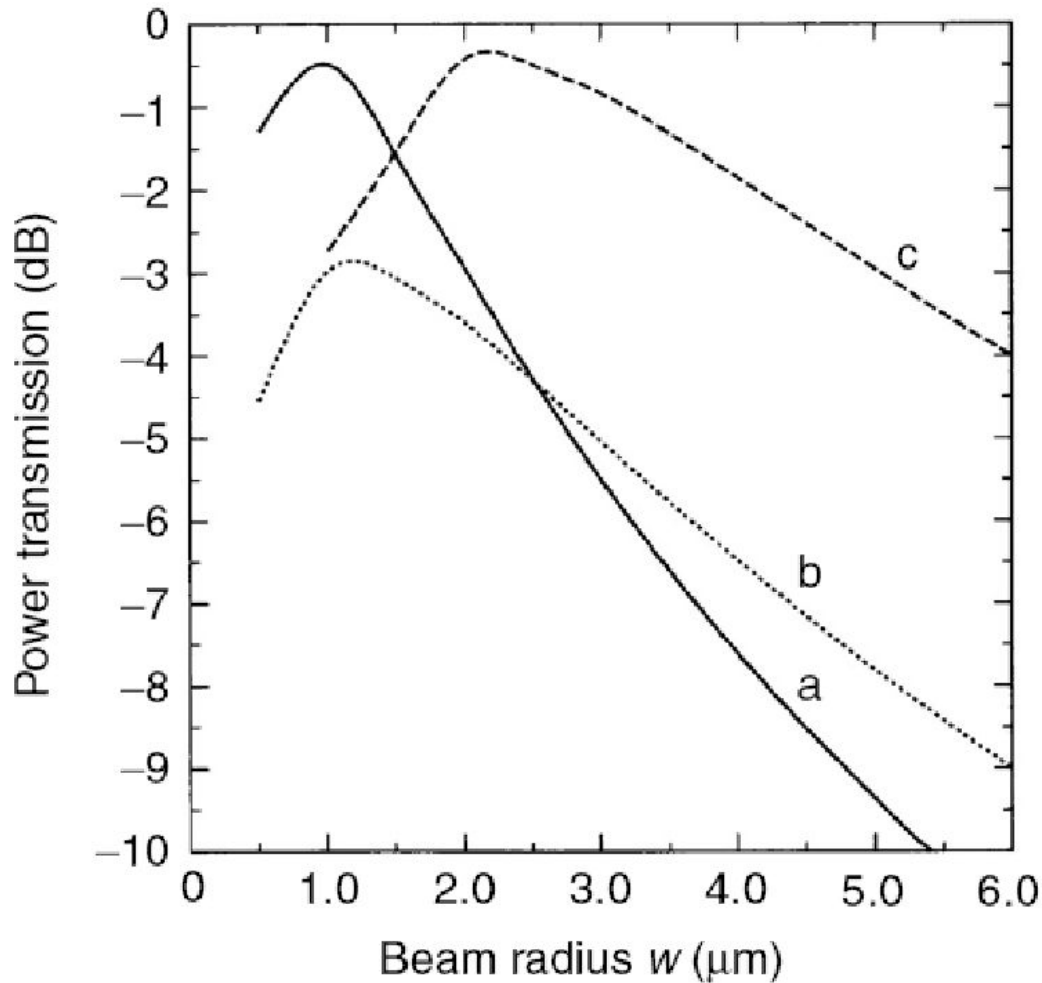
$$T = \frac{4}{\left(\frac{w_1}{w_2} + \frac{w_2}{w_1} \right)^2 + 4 Z^2} \text{ with } Z = \frac{D}{n_{\text{Gap}} k w_1 w_2}$$



$$T = \left[\frac{2w_1 w_2}{w_1^2 + w_2^2} \right]^2 \exp - \left[\frac{2(\pi n_{\text{Gap}} w_1 w_2 \Theta)^2}{(w_1^2 + w_2^2) \lambda^2} \right]$$

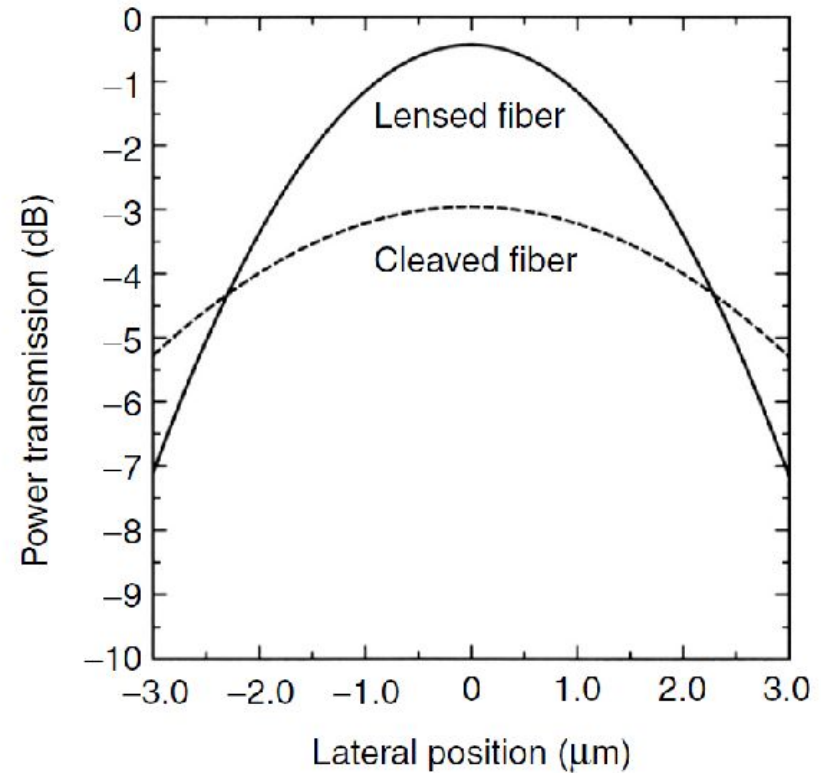
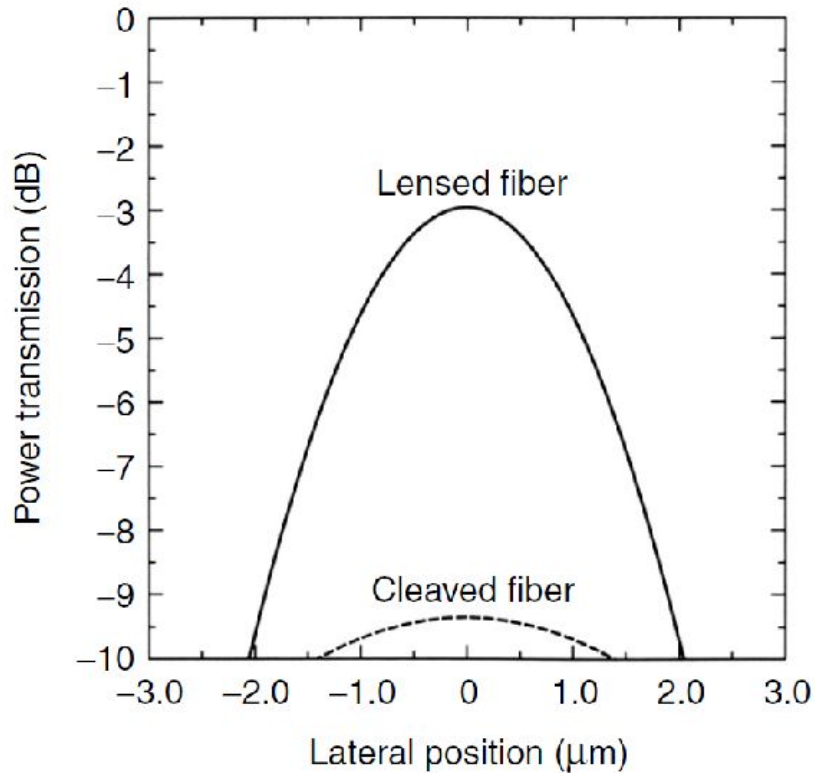
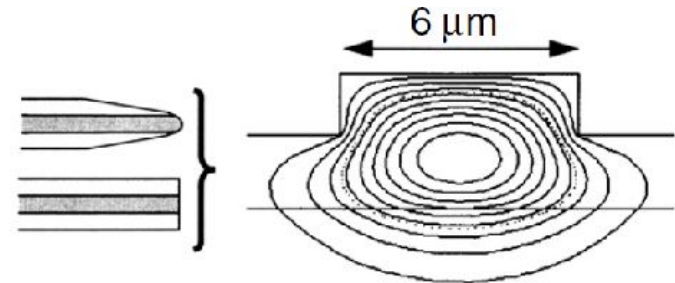
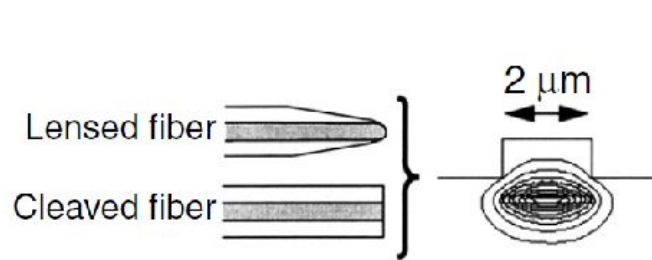
[R.A. Boudreau, S.M. Boudreau. Passive micro-optical alignment methods. Taylor and Francis group. 2005. P. 108]

Потери при соединении волноводов и волоконных световодов



[R.A. Boudreau, S.M. Boudreau. Passive micro-optical alignment methods. Taylor and Francis group. 2005. P. 109]

Потери при соединении волноводов и волоконных световодов



[R.A. Boudreau, S.M. Boudreau. Passive micro-optical alignment methods. Taylor and Francis group. 2005. P. 110]

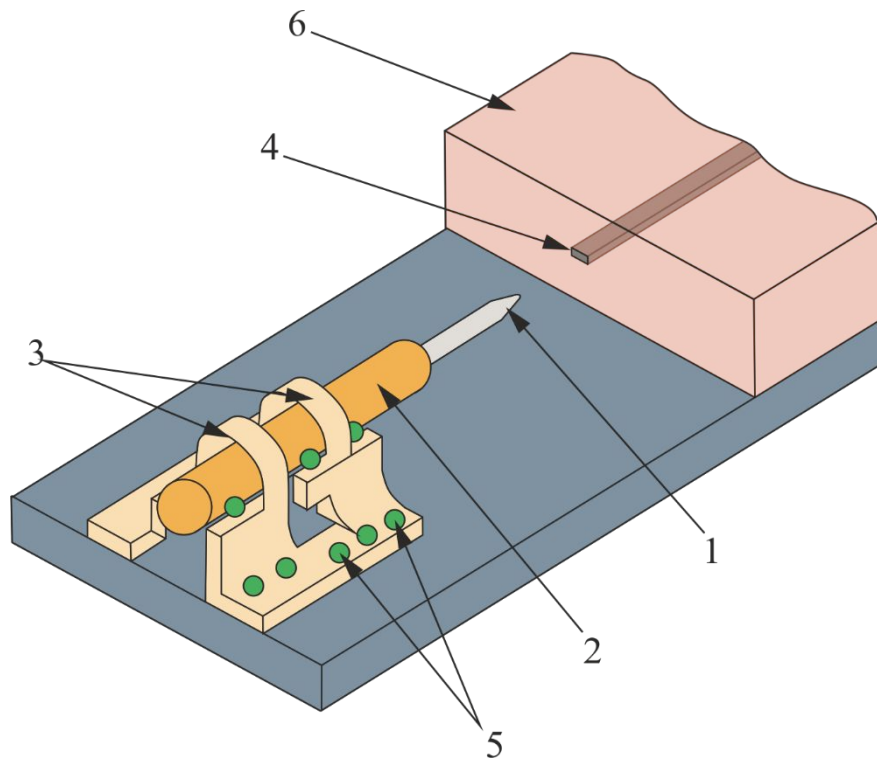
Что такое оптическая стыковка?

Оптическая стыковка – процесс создания неразрывного соединения между волоконными световодами и волноводами фотонной интегральной схемы.

Этапы оптической стыковки:

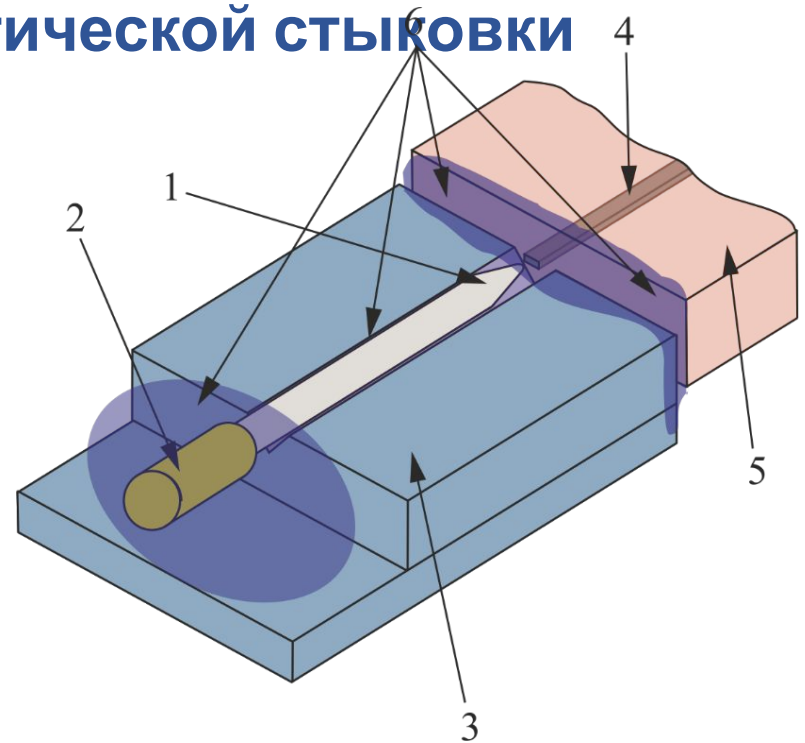
1. Подготовка образцов.
2. «Грубое» подведение волоконных световодов к волноводам ФИС.
3. «Точное» выравнивание волоконных световодов с волноводами ФИС.
4. Фиксация соединения волоконных световодов с волноводами ФИС с помощью оптического клея.

Разновидности технологий оптической стыковки



1 – конусная линза, 2 – феррула, 3 – клипсы, 4 – волновод, 5 – точки сварки, 6 – ФИС.

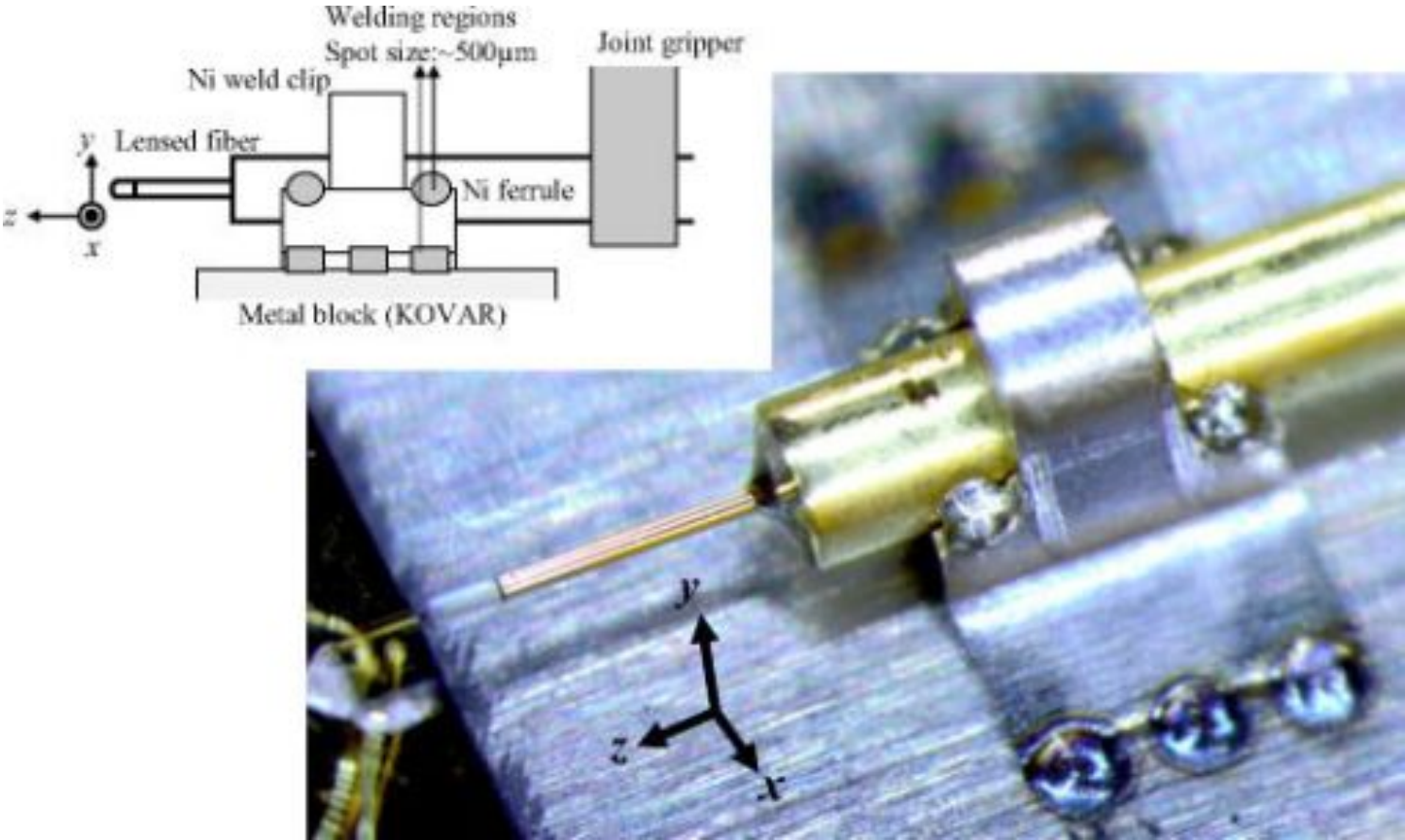
Технология соединения ВС с конусной линзой и волновода малого диаметра с использованием клипс специального дизайна



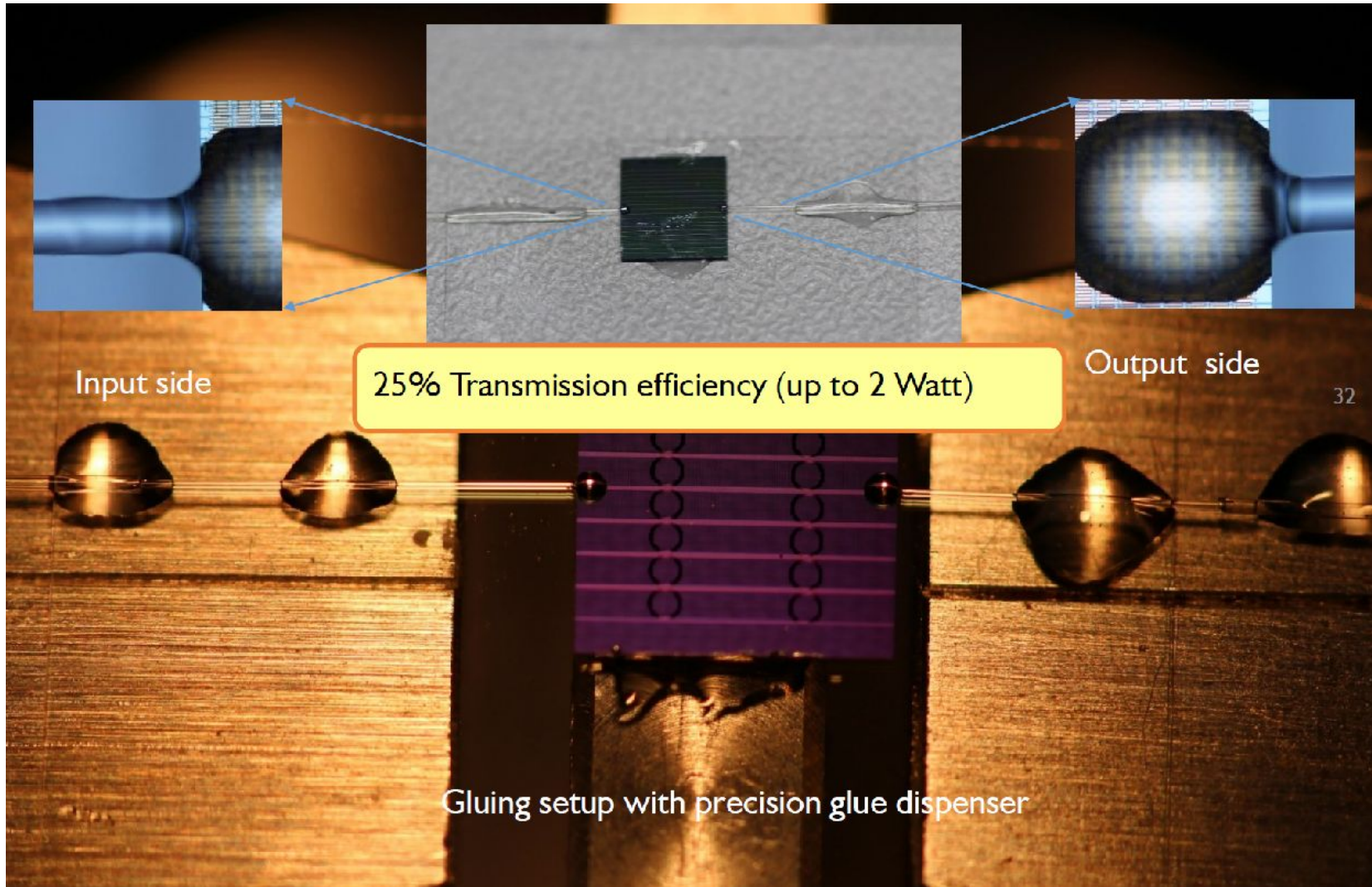
1 – ВС с конусной линзой, 2 – буферное покрытие ВС, 3 – оптический наконечник, 4 – волновод малого диаметра, 5 – ФИС, 6 – УФ-отверждаемый полимерный клей.

Технология соединения ВС с конусной линзой и волновода малого диаметра с помощью клея

Оптическая стыковка с помощью лазерной сварки

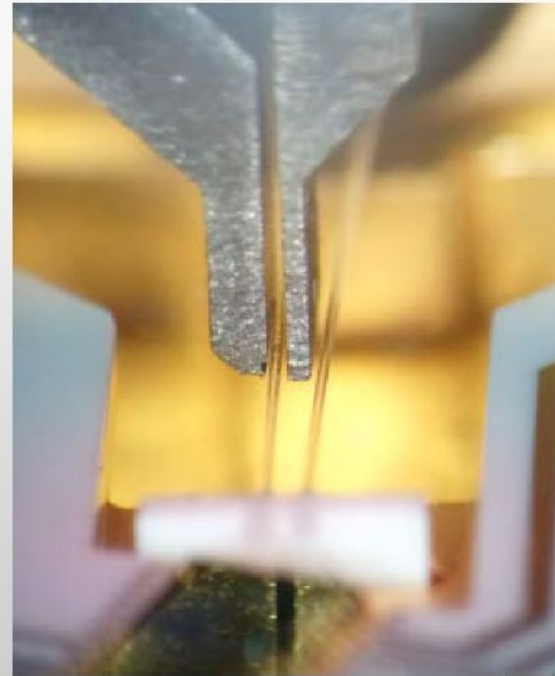
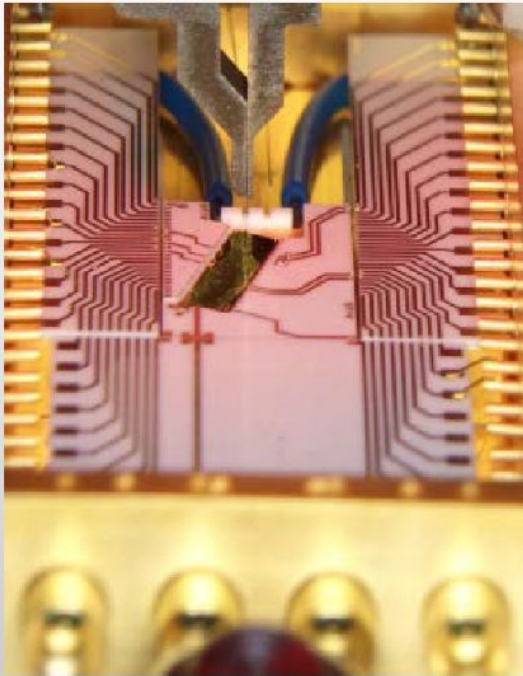


Клеевая оптическая стыковка

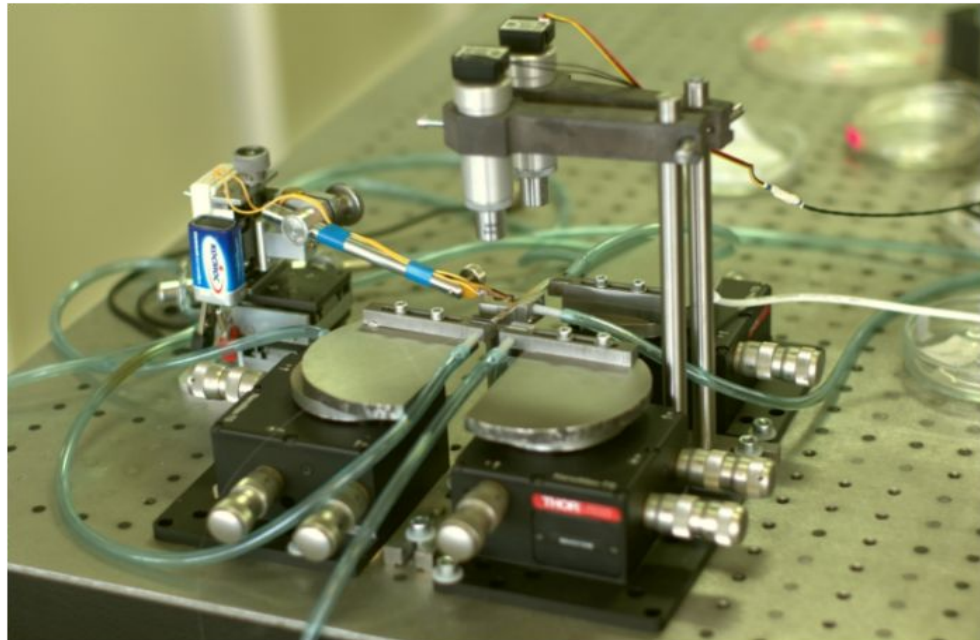
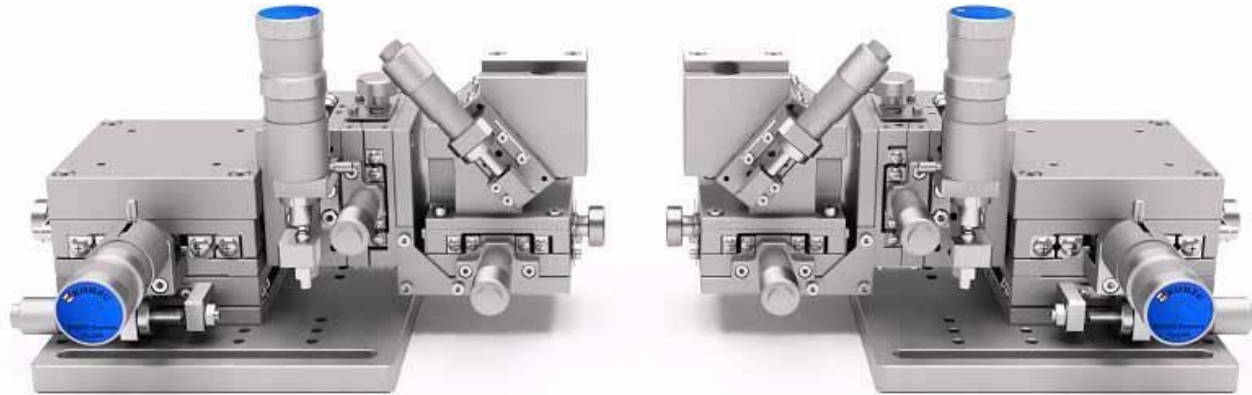


Клеевая оптическая стыковка

- Lensed fiber alignment details



Ручные установки по оптической стыковке



Полуавтоматические установки по оптической стыковке



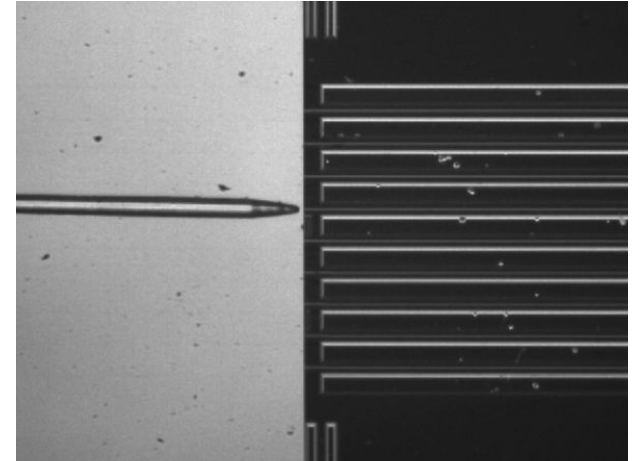
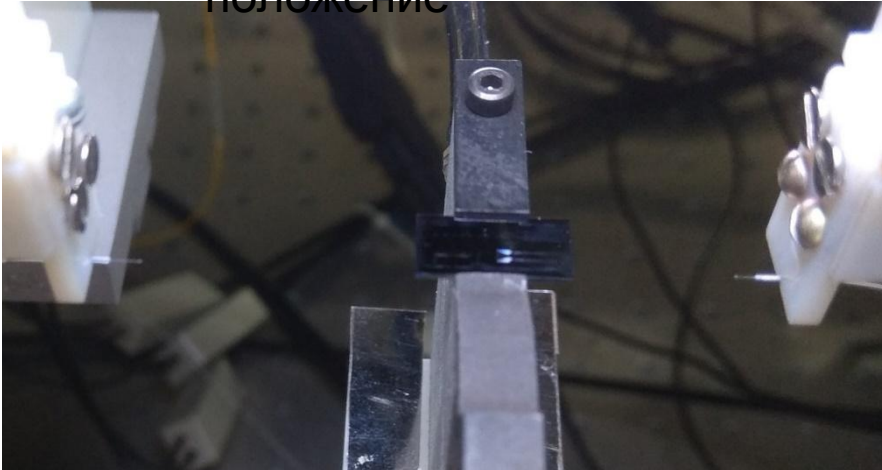
Подготовка образцов

Видео

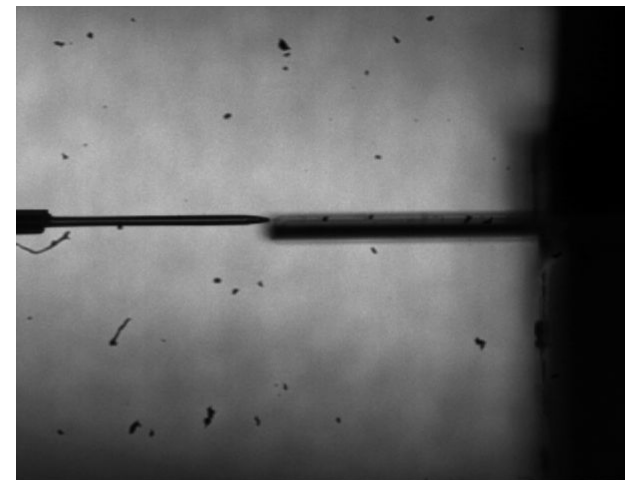
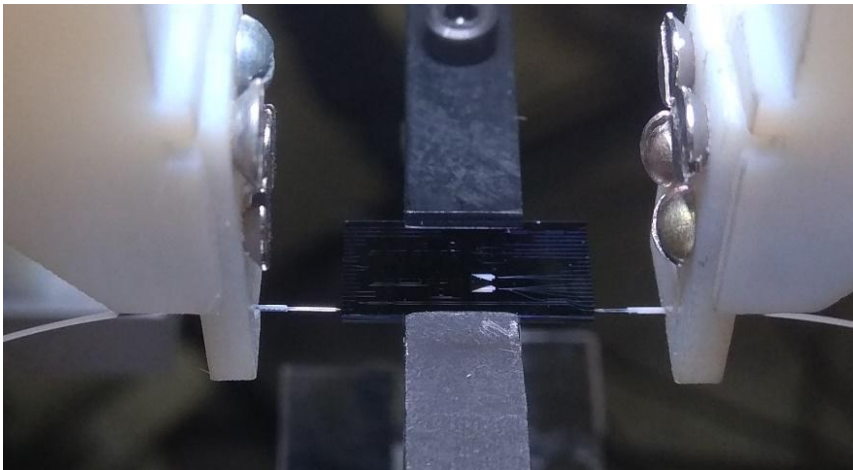
Silicon_Photonics___Automated_Alignment___Manufacturing_
of___Fiber-Optics_Components_(MosCatalogue.net)

«Грубое» подведение волоконных световодов к волноводу ФИС

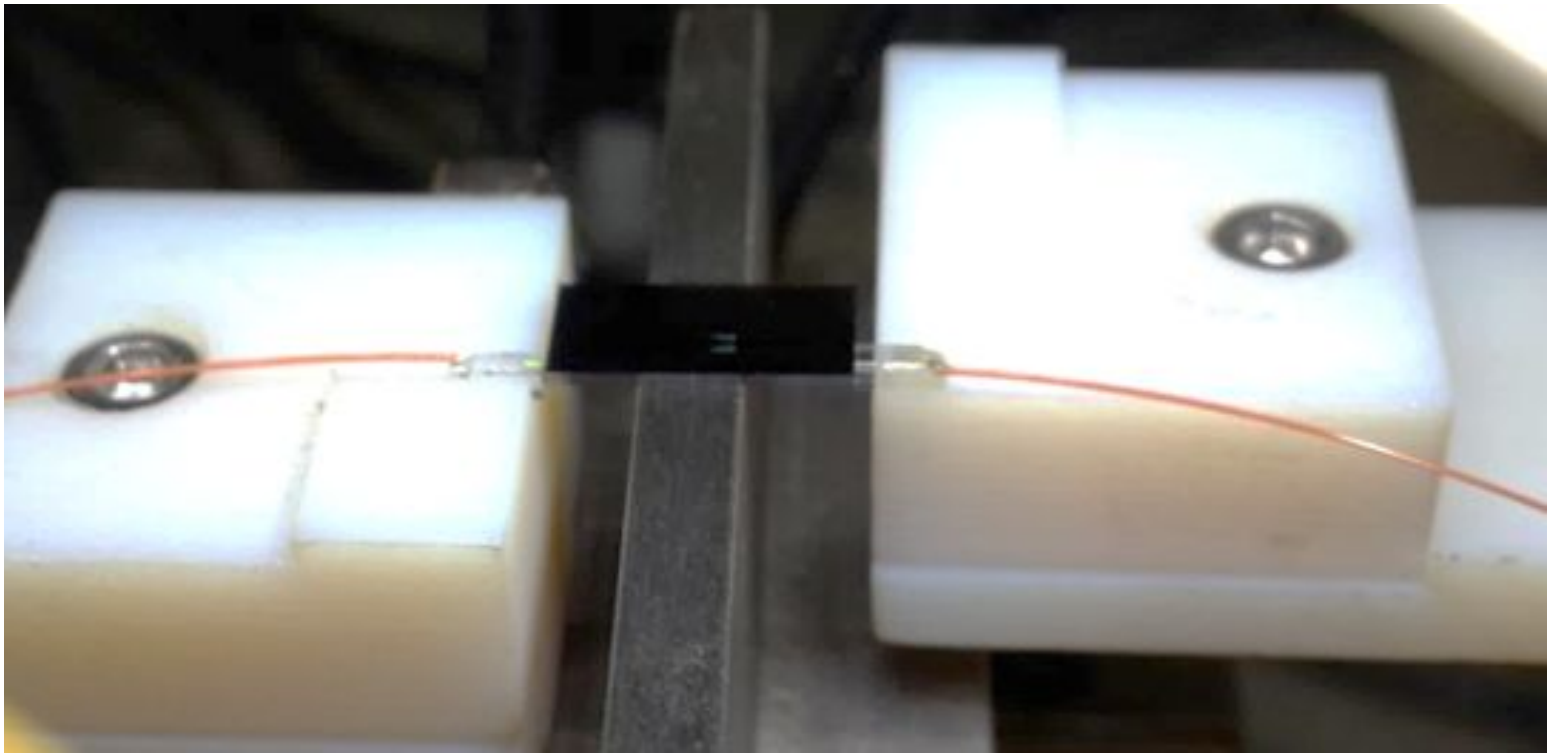
Начальное
положение



Конечное положение



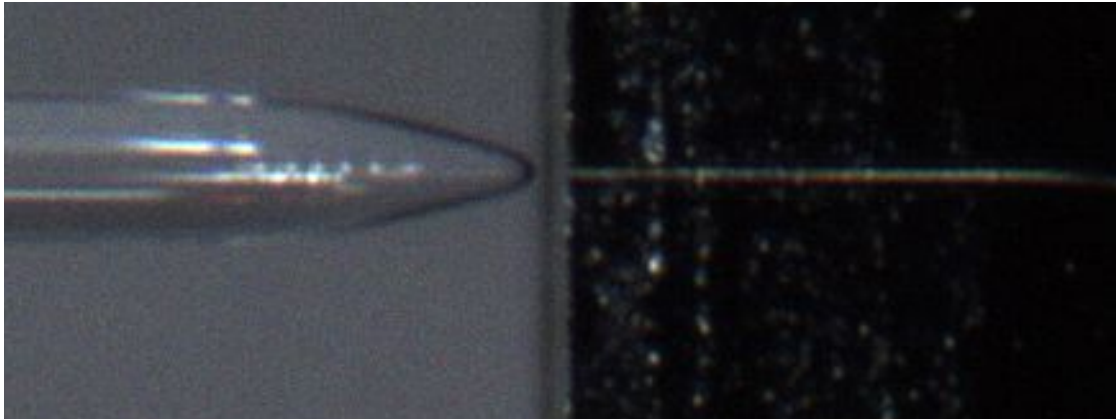
«Грубое» подведение волоконных световодов к волноводу ФИС



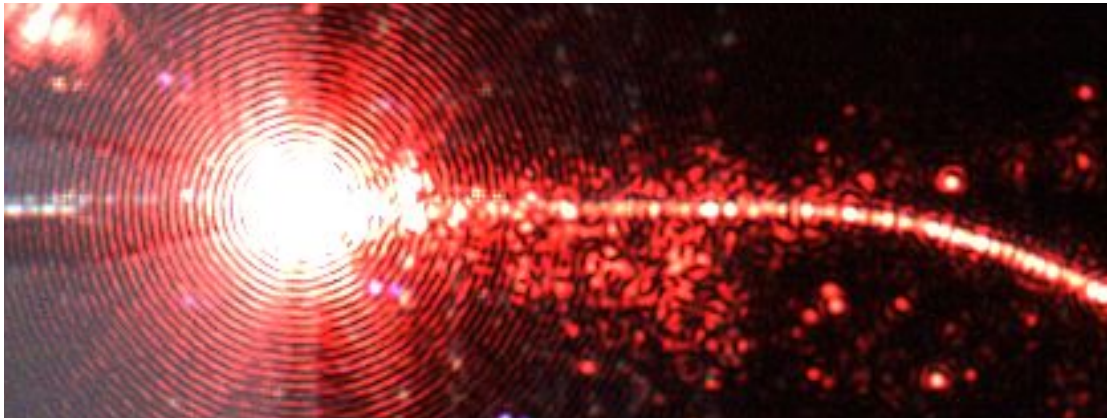
Стыковка ФИС и волоконно-оптических соединителей

«Грубое» подведение волоконных световодов к волноводу ФИС

а)
)

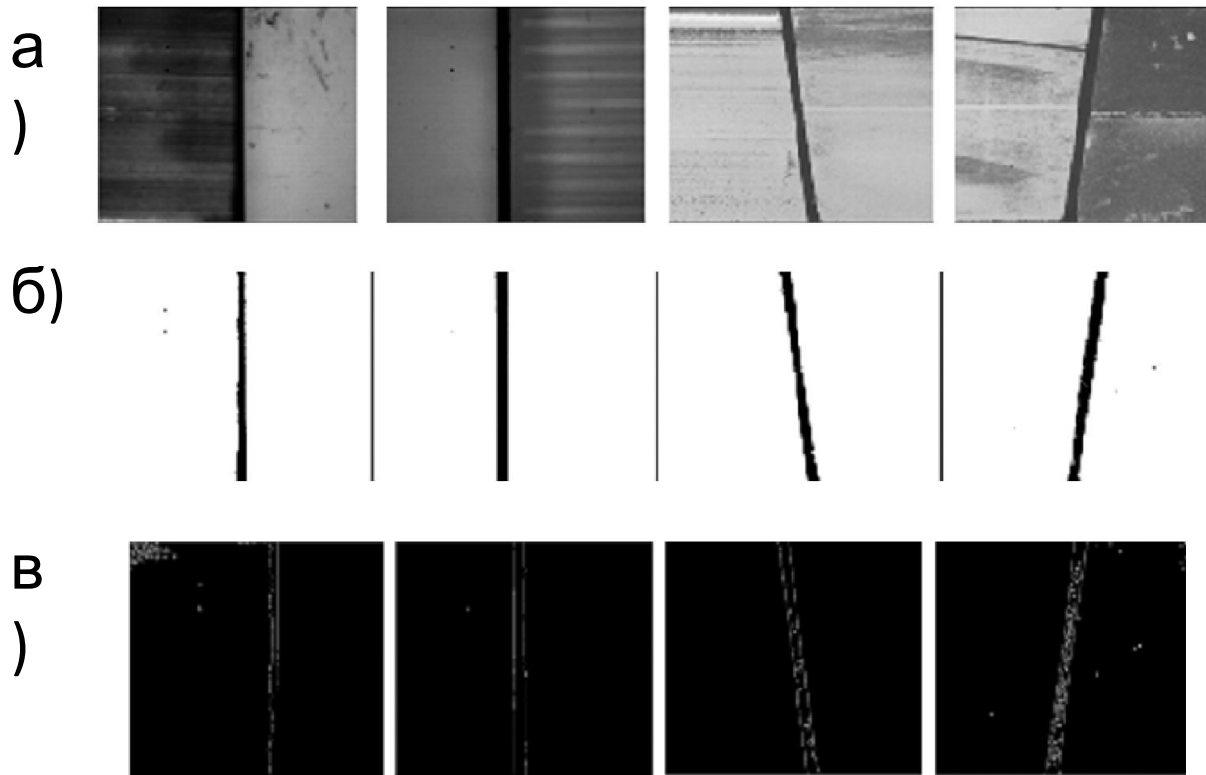


б)



Стыковка волоконного световода с конусной линзой и ФИС. а) линза подведена к волноводу, б) каналирование видимого оптического излучения в волноводу

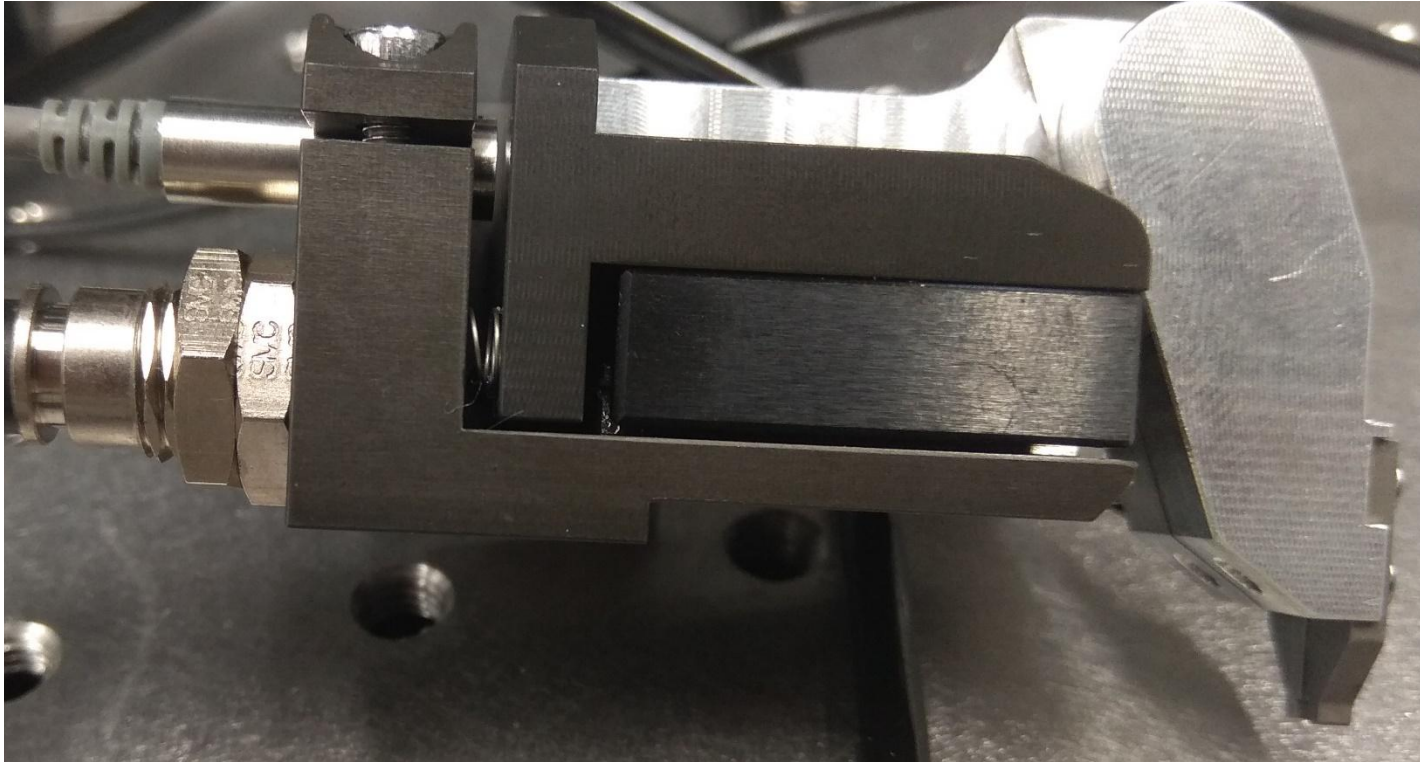
«Грубое» подведение волоконных световодов к волноводу ФИС



а) Полученные изображения, б) после бинаризации, в) результаты детектирования границ стыкуемых объектов.
Определение границ у стыкуемых объектов

[Y. Zheng, X. Kai, J. Duan, B. Li. Automated visual position detection and adjustment for optical waveguide chips and optical fiber arrays // PHOTOPTICS-2015. 2015. № 22. P. 77–80]

«Грубое» подведение волоконных световодов к волноводу по механическому сигналу



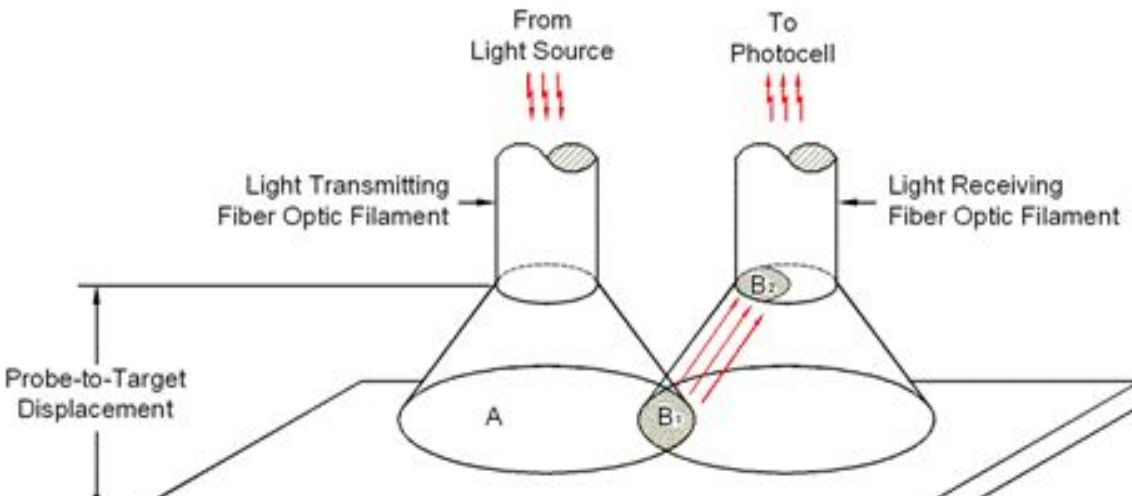
Пример использования токовихревого датчика расстояния. Точность датчика 0.4 мкм, диапазон измерения от 0 до 1 мм

«Грубое» подведение волоконных световодов к волноводу по механическому сигналу

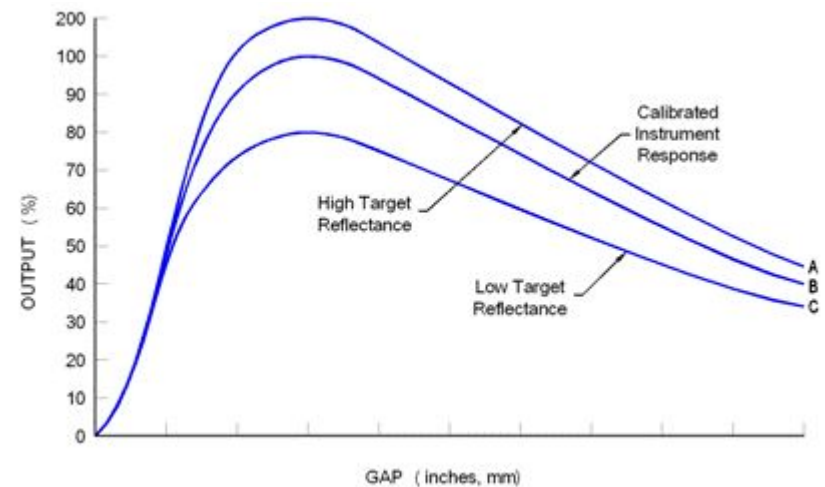
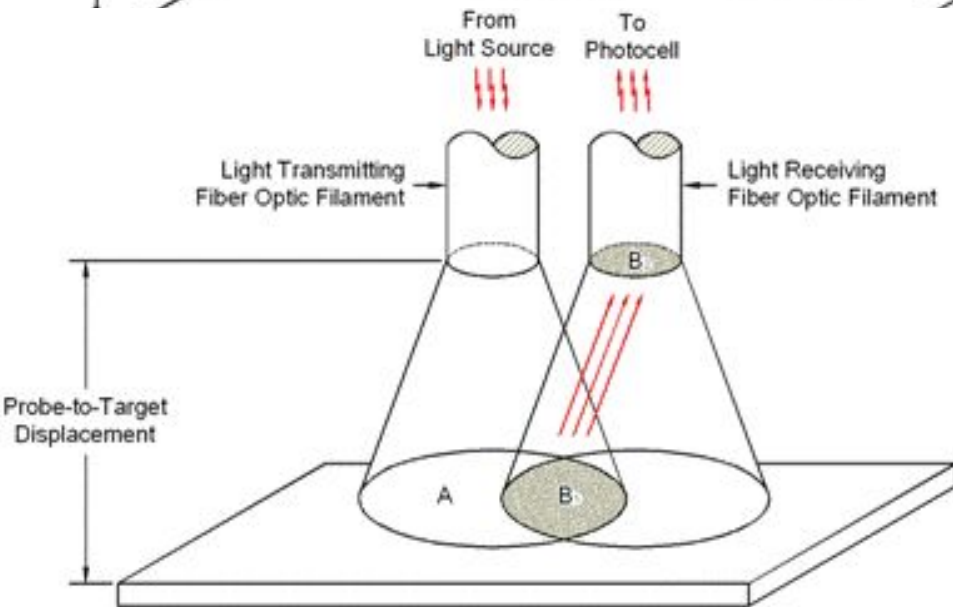
Видео

[Auto_Alignment_Bonding_System__IFA-600__\(MosCatalogue.net\)](#)

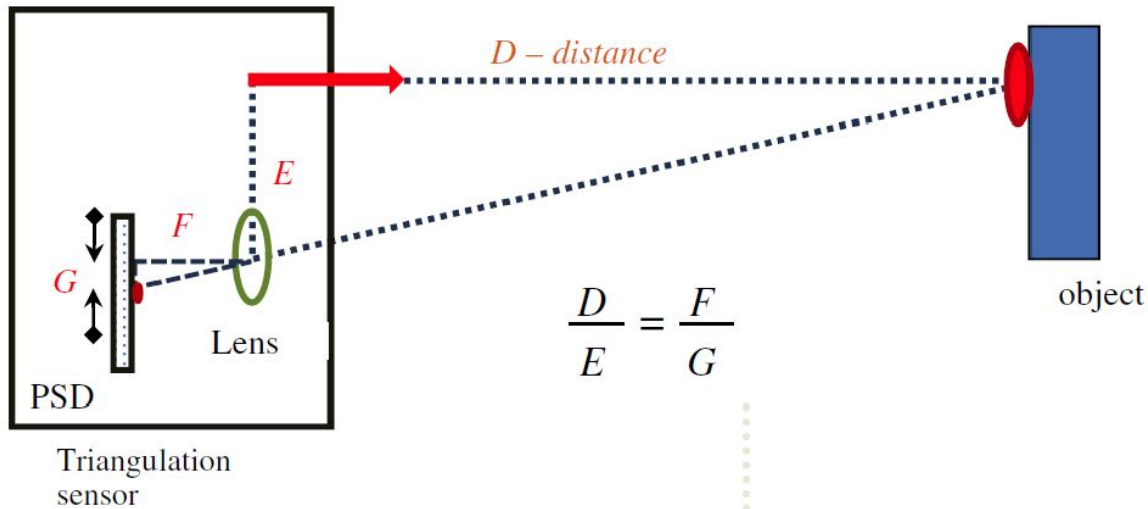
«Грубое» подведение волоконных световодов к волноводу по механическому сигналу



Точность до 10 нм,
диапазон ~ 1 мм

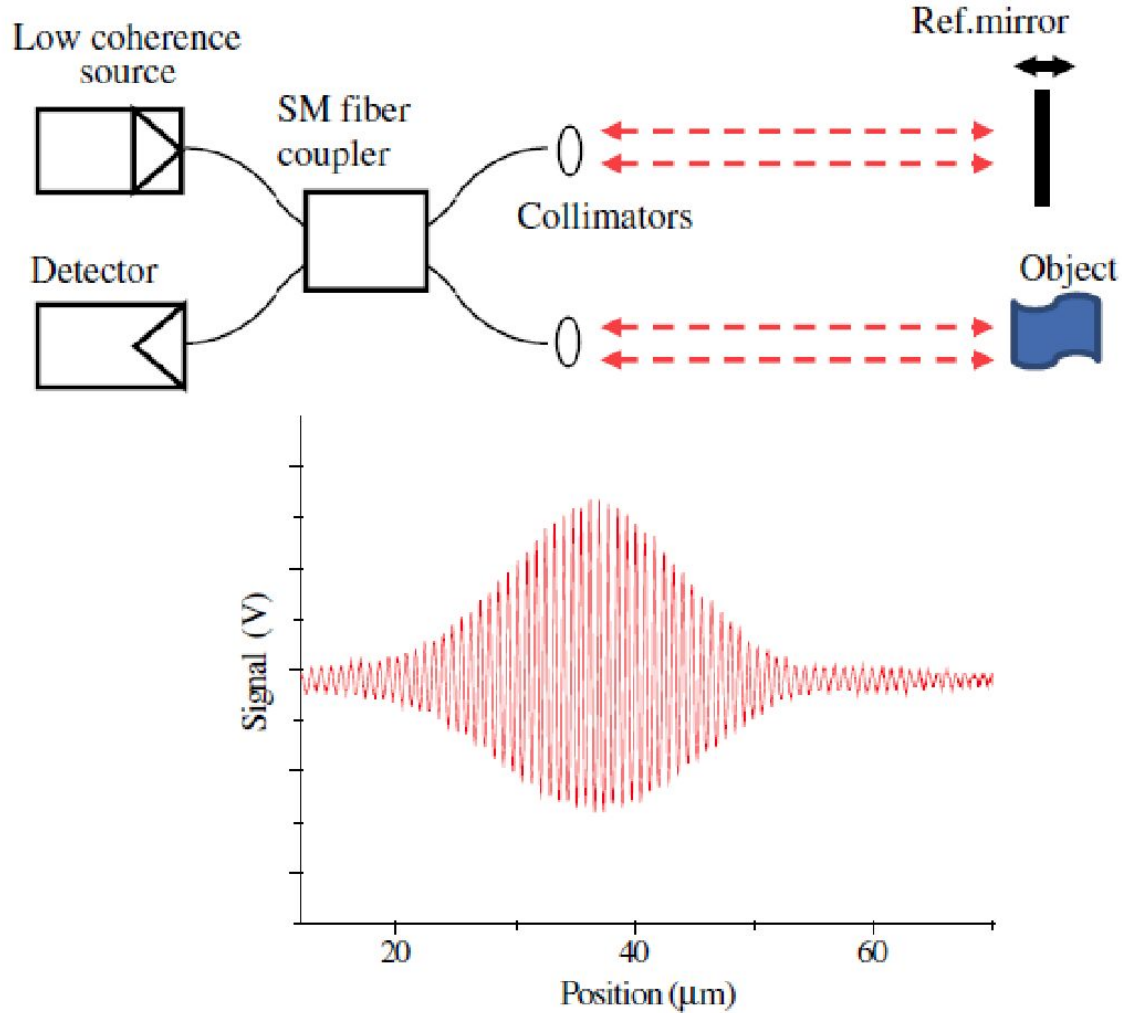


«Грубое» подведение волоконных световодов к волноводу по механическому сигналу



Principle of optical triangulation sensor. The unknown distance, D , is determined from the known distances E , F and the measured value of G —the distance to the pixel in the position sensitive detector (PSD) recording the image of the laser spot on the measured object.

«Грубое» подведение волоконных световодов к волноводу по механическому сигналу



«Точное» выравнивание волоконных световодов с волноводом ФИС по уровню оптического сигнала

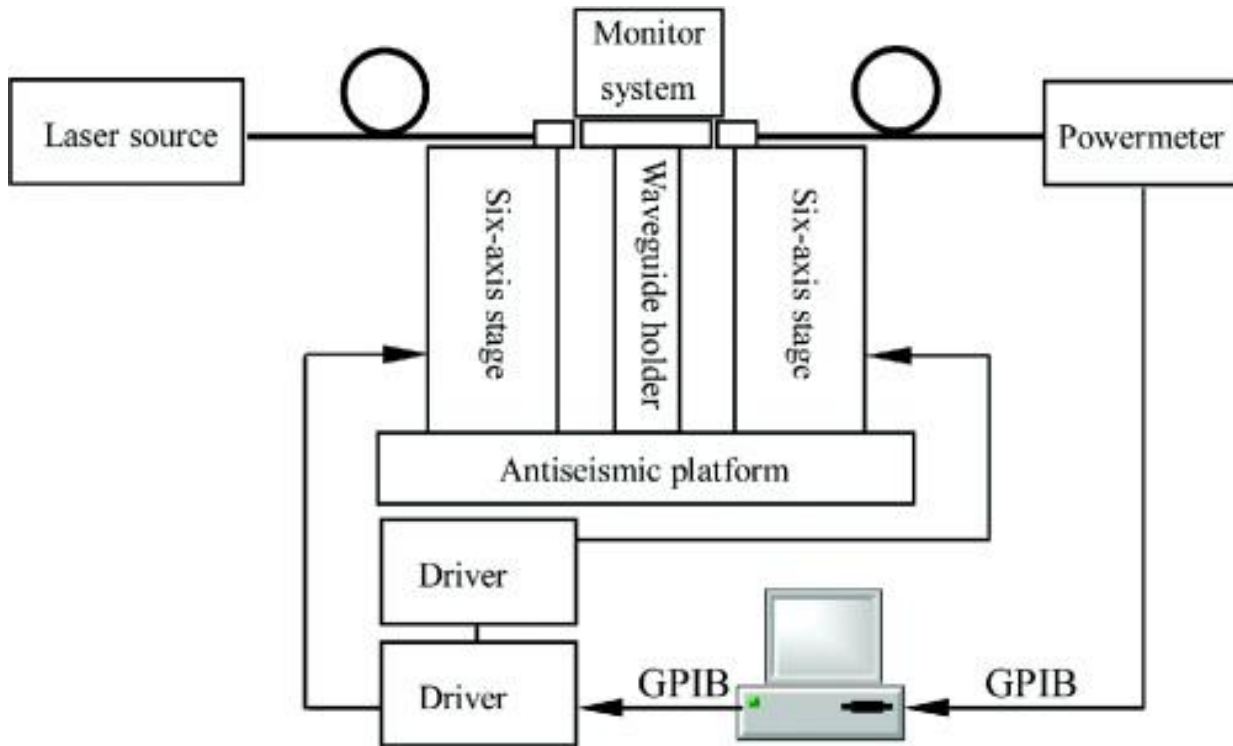
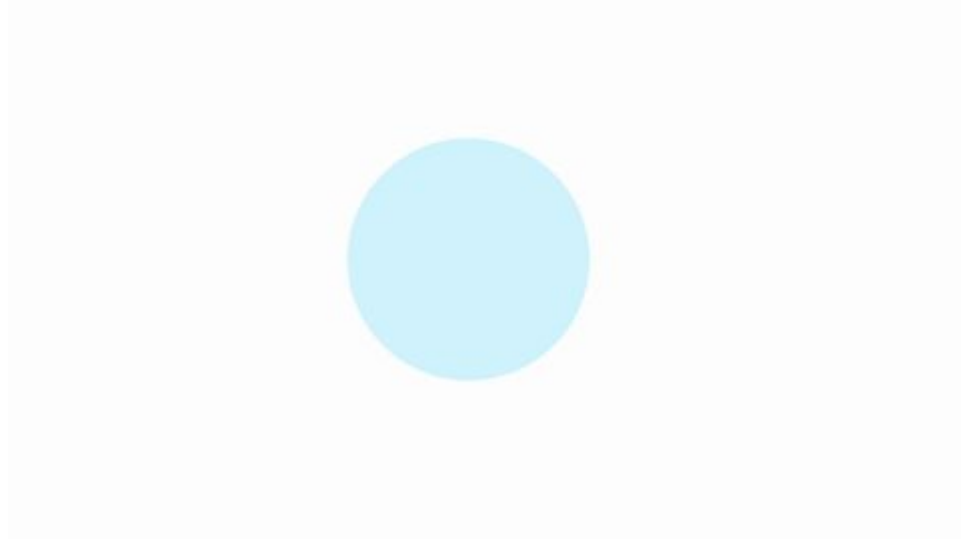
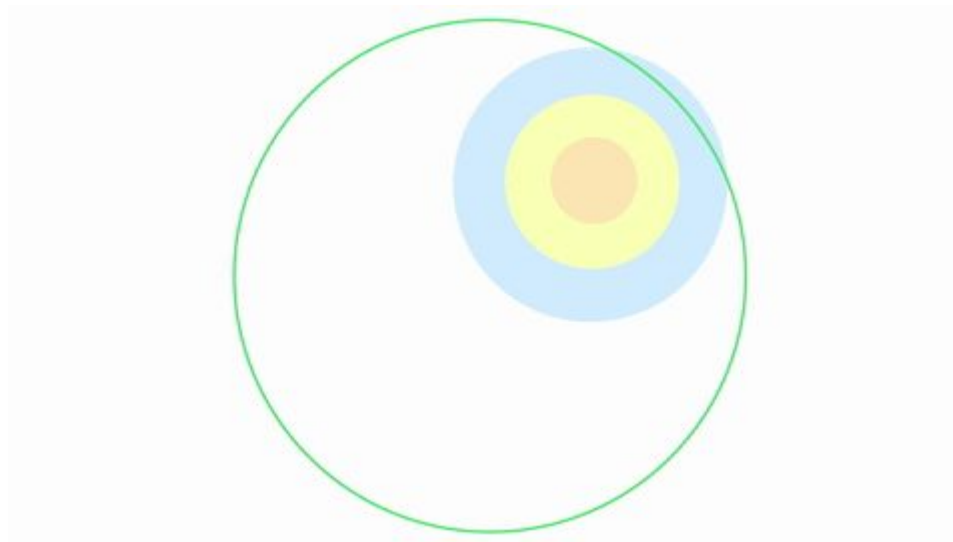


Схема точного выравнивания волновода и волоконного световода по уровню оптического сигнала

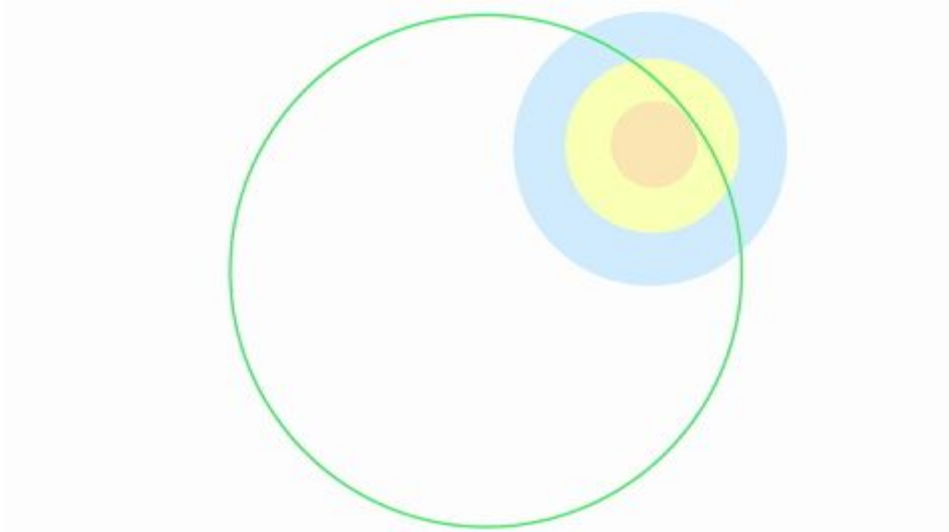
Статический алгоритм выравнивания «змейка»



Статический алгоритм выравнивания «спираль»



Статический алгоритм выравнивания «спираль составная»



Динамический алгоритм выравнивания

«Вибрация»

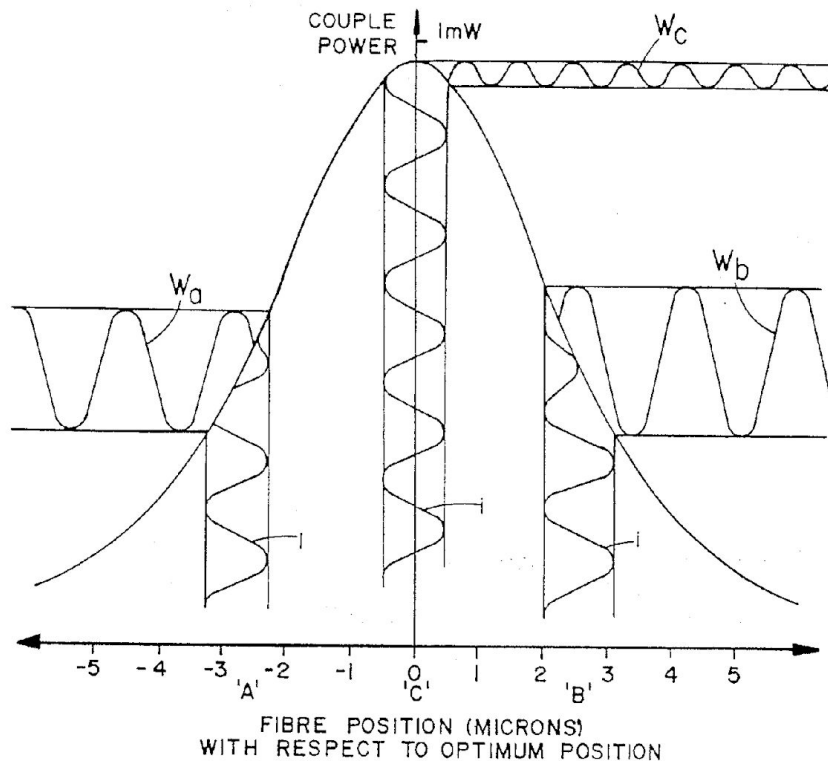
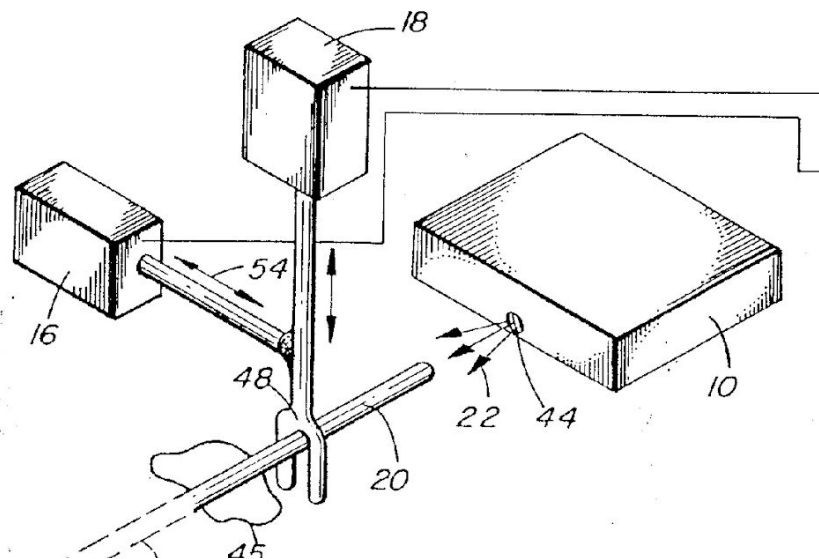
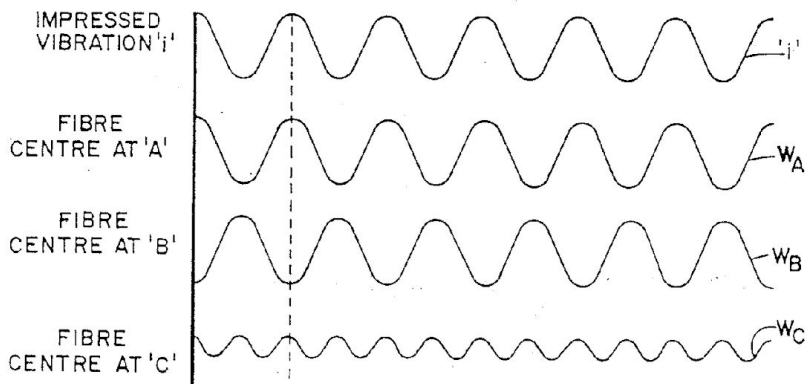


FIG. 2



Динамический алгоритм выравнивания «петля»

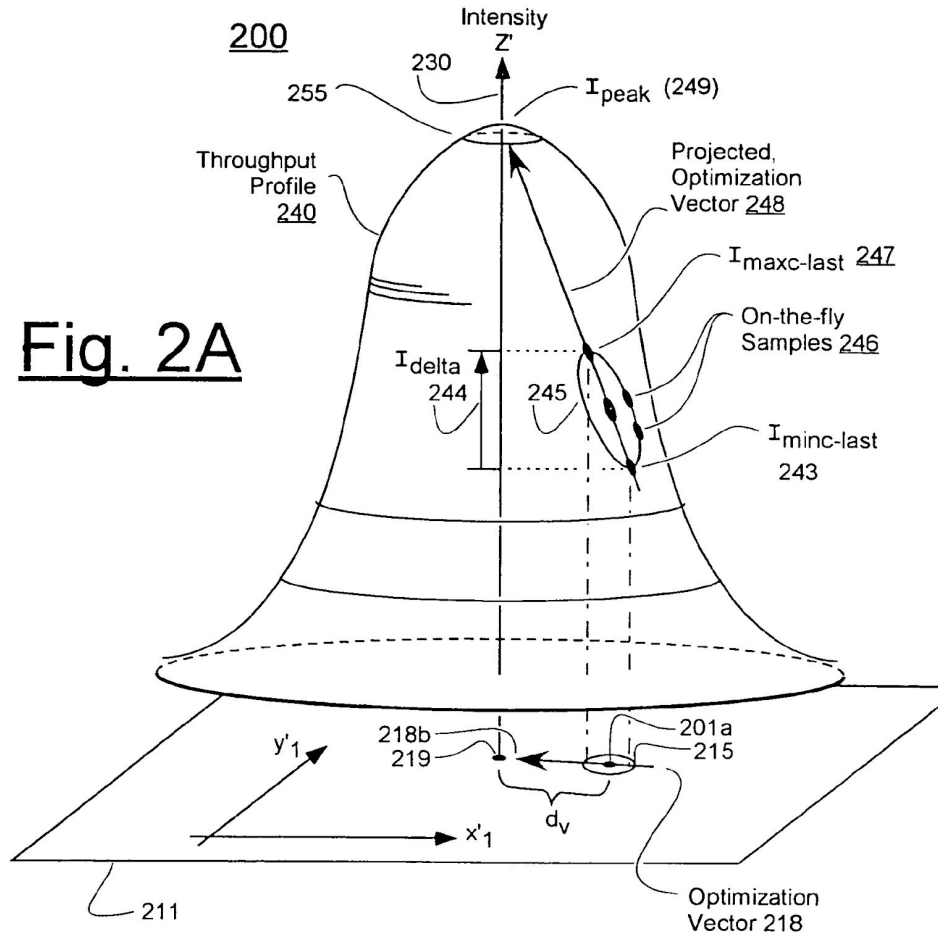
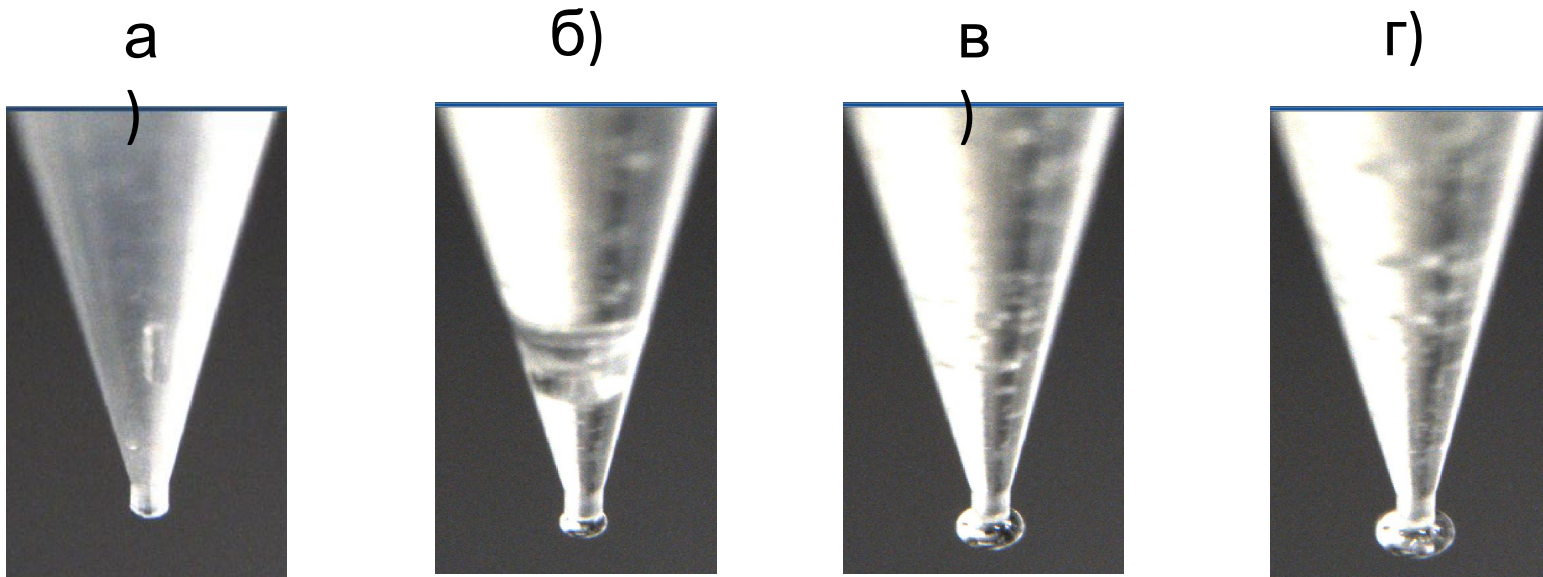


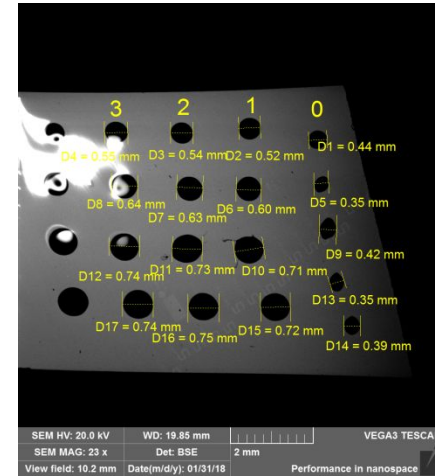
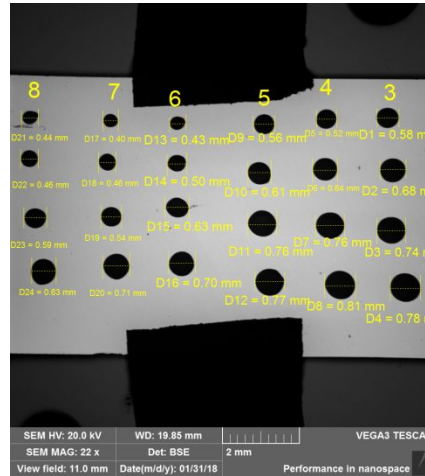
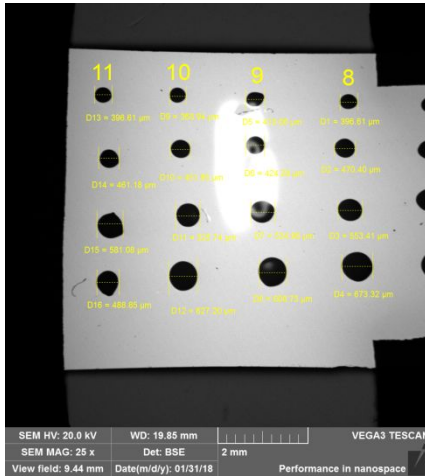
Fig. 2A

Нанесение полимера



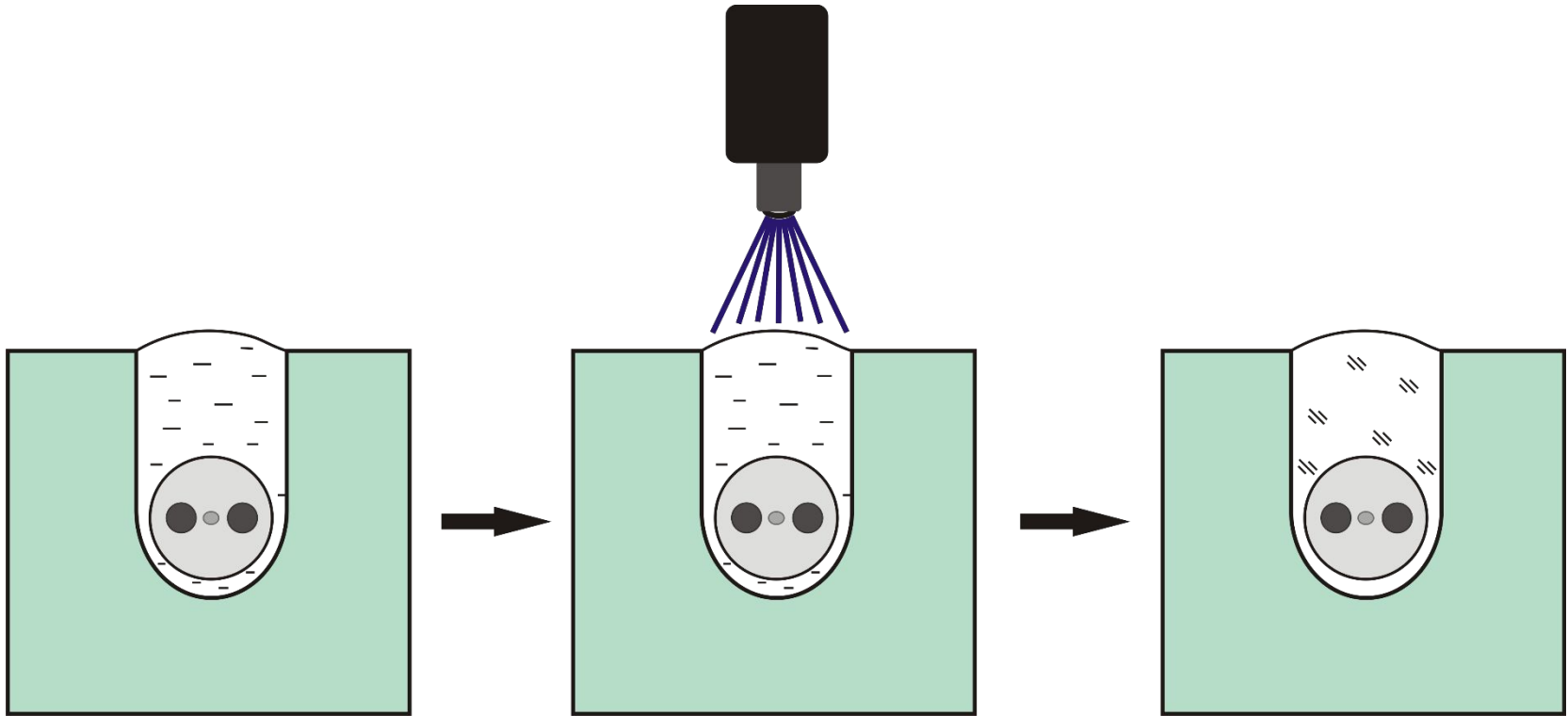
а) Игла без капли клея, б) капля клея малого размера, в) капля оптимального размера, в) капля большого размера.
Фотография иглы шприца дозатора при увеличении 2X

Нанесение полимера



Результат нанесения капель полимера в различных режимах на пластине из LNbO_3

УФ отверждение полимера



УФ отверждение полимера



Высокоточный УФ полимеризатор Omnicure LX500 с набором светодиодных линзованных головок

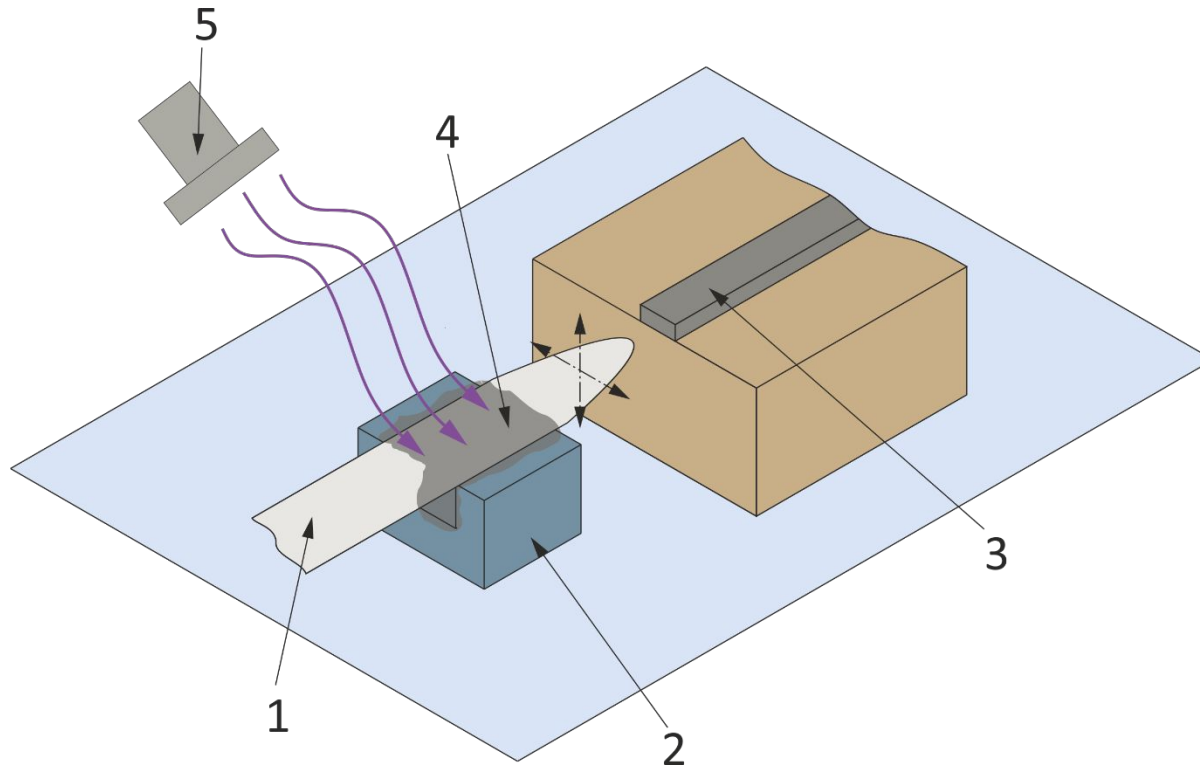
Разработка алгоритмов управления системы по серийной клеевой стыковке чипа фотонной интегральной схемы и волоконного световода

Работа посвящена особенностям информационного обеспечения и алгоритмизации процесса сборки фотонных интегральных схем (ФИС).

Идея исследования заключается в разработке новых программно-технических средств контроля за фиксацией соединения ВС и волновода ФИС во время стыковки.

Решение научной проблемы ищется в организации управляемой усадки клея, в предсказании результатов стыковки по геометрическим параметрам основных объектов, в сборе и анализе статистики по каждой операции во время стыковки.

Способ клеевой стыковки волновода малого диаметра и волоконной линзы



1 – волоконный световод с конусной линзой, 2 – вспомогательное основание с пазом, 3 – волновод, 4 – полимер, 5 – УФ диод с линзой.
Схема способа стыковки с динамической компенсации смещений между волоконной линзой и волноводом в результате усадки полимера

Структура работы

№ глав	Наименование	Аннотация	Срок написания
	Введение	10.12.2020
Глава 1	Стыковка фотонных интегральных схем (литературный обзор)	Обзор современного состояния стыковки ФИС, анализ существующего оборудования, технологий. Выделение ключевых вопросов, проблемных областей. Определение областей для которых существует недостаток данных или результатов исследований	10.12.2018
Глава 2	Алгоритмы выравнивания волновода фотонной интегральной схемы с оптическим волокном	Демонстрация разработанных алгоритмов «точного» выравнивания , результаты практической реализации. Статья №1	10.05.2019
Глава 3	Техническое зрение в клеевой стыковке фотонных интегральных схем с оптическим волокном	Разработка системы технического зрения для «грубого» подведения и нанесения повторяемого количества полимера. Статья №2	10.05.2019
Глава 4	Способ полимеризации клея в оптической стыковке	Описание способа полимеризации клея с минимальной деградацией смещений стыкуемых компонентов. Патент на способ	18.05.2020
	заключение	18.12.2020

Стыковка фотонных интегральных схем

В рамках второй главы работы реализованы и испытаны на практике алгоритмы выравнивания на основе статического растрового сканирования типа «змейка» и динамического сканирования типа «петля». Ведутся работы над разработкой собственного алгоритма. Предполагается использовать модуляцию света источника.

Спасибо за внимание!

Карнаушкин Павел Викторович
Аспирант ПГНИУ

Инженер-исследователь научно-исследовательского центра радиофотоники и
оптоэлектроники ПАО «ПНППК»

Email: pavelkarn2@gmail.com pavelkarn@mail.ru

Тел. +79097288369