ЧПОУ «СККИТ»

Геометрическая оптика: от лучей к современным технологиям

РАЗДЕЛ 1 · ОСНОВЫ

Что изучает геометрическая оптика

Свет как совокупность лучей

Геометрическая оптика описывает распространение света через понятие луча — линии, вдоль которой переносится световая энергия. Приближение работает, когда длина волны много меньше размеров объектов и препятствий на пути света.

Луч, среда, показатель преломления

Ключевые понятия раздела — луч, оптическая среда и показатель преломления $n = c/v$, где c — скорость света в вакууме, v — в среде. Из этих величин выводятся законы отражения и преломления.

Место среди других разделов оптики

Волновая оптика объясняет интерференцию и дифракцию, квантовая — фотоэффект и взаимодействие света с веществом. Геометрическая оптика — предельный случай волновой при длине волны, стремящейся к нулю.

Приближение геометрической оптики применимо, когда $\lambda \ll$ размеров объектов

ОСНОВЫ

Четыре закона геометрической оптики

01

Закон прямолинейного распространения

В однородной прозрачной среде свет распространяется по прямым линиям. Именно поэтому мы видим предметы по лучам, идущим от них к глазу.

02

Закон независимости световых пучков

Отдельные пучки света распространяются независимо друг от друга и не влияют на ход остальных: пересекаясь, они не искажают друг друга.

03

Закон отражения

Угол падения равен углу отражения: $\alpha = \gamma$. Падающий и отражённый лучи и нормаль к поверхности лежат в одной плоскости.

04

Закон преломления

Отношение синусов углов падения и преломления равно отношению показателей преломления сред: $\sin \alpha / \sin \beta = n_2 / n_1$.

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Закон преломления света (закон Снеллиуса)

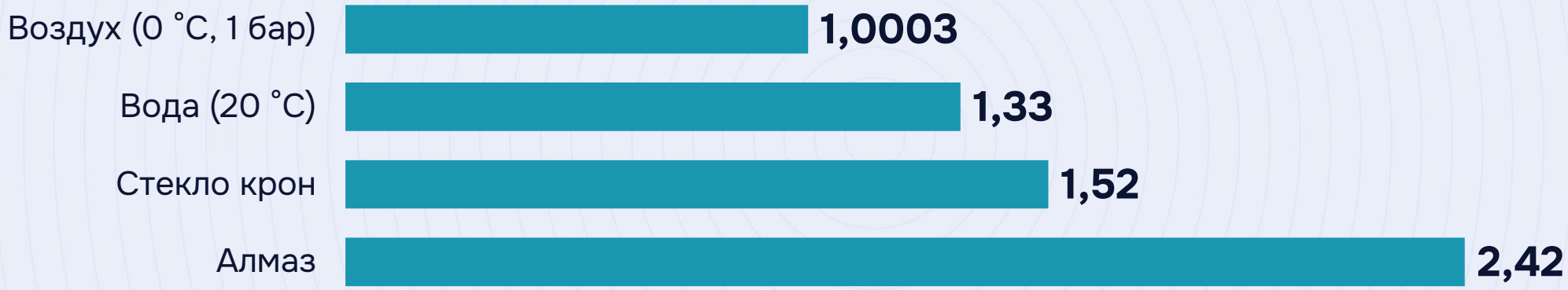
На границе двух сред луч меняет направление: отношение синусов углов равно обратному отношению показателей преломления. Для плоской границы и изотропных сред.

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

n_1	Показатель преломления первой среды (откуда идёт луч)	безразмерный
n_2	Показатель преломления второй среды (куда входит луч)	безразмерный
θ_1	Угол падения — между лучом и нормалью к границе	градусы
θ_2	Угол преломления — между преломлённым лучом и нормалью	градусы
$\sin\theta_{\text{пред}} = \frac{n_2}{n_1}$	Предельный угол полного внутреннего отражения (при $n_1 > n_2$)	$n_2 < n_1$

Углы отсчитываются от нормали; при $n_1 > n_2$ и $\theta_1 > \theta_{\text{пред}}$ преломлённый луч отсутствует — полное внутреннее отражение.

Показатели преломления: сравнение сред



Чем выше n, тем сильнее преломляется луч: у алмаза критический угол ~24°, свет многократно отражается внутри.

Источник: Список показателей преломления, Википедия; измерения на линии D натрия, 589 нм

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Тонкая линза: формула и построение изображения

Формула тонкой линзы связывает фокусное расстояние с положением предмета и изображения; применима для параксиальных лучей.

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}, \qquad D = \frac{1}{F}$$

F	фокусное расстояние линзы	м
d	расстояние от предмета до линзы	м
f	расстояние от линзы до изображения	м
D	оптическая сила линзы	дптр

Допущение: лучи параксиальные, линза тонкая; для рассеивающей линзы F и D берут со знаком минус.

СОБИРАЮЩАЯ ЛИНЗА

Предмет за двойным фокусом

- Предмет между F и 2F: изображение действительное, увеличенное, перевёрнутое
- Предмет внутри фокуса: изображение мнимое, увеличенное, прямое
- Формула тонкой линзы 1/F = 1/d + 1/f связывает все три случая

РАССЕИВАЮЩАЯ ЛИНЗА

Всегда мнимое, уменьшенное, прямое

+ Лучи сходятся за двойным фокусом — изображение всегда мнимое, уменьшенное и прямое
+ Рассеивающая линза не даёт действительных изображений ни при каком положении предмета
+ Оптическая сила D = 1/F измеряется в диоптриях и остаётся постоянной

ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

От лупы до телескопа: как работают оптические приборы

Лупа

Увеличение 2–20×. Короткофокусная линза, предмет ближе фокуса — мнимое увеличенное изображение.

Микроскоп

До 1500×. Объектив даёт действительное увеличенное изображение, окуляр работает как лупа.

Телескоп-рефрактор

Объектив — длиннофокусная линза, собирает свет далёких объектов; окуляр увеличивает изображение.

Фотоаппарат

Объектив строит действительное изображение на матрице; фокусировка меняет расстояние до линзы.

Глаз

Роговица и хрусталик — собирающая система, сетчатка — экран. Аккомодация меняет оптическую силу хрусталика.

Общий принцип

Формула тонкой линзы связывает фокус, расстояние до предмета и до изображения — основа расчёта любого прибора.

АНАЛИЗ

Аберрации: почему реальные линзы не идеальны

+ Плюсы: что даёт коррекция

Асферические поверхности убирают сферическую аберрацию и кому

Склейки из стёкол с разной дисперсией гасят хроматическую аберрацию

Многослойные покрытия повышают светопропускание и контраст

Расчёт по законам геометрической оптики даёт предсказуемый ход лучей

− Минусы: чем платим

Сложная геометрия поверхности — дорогое и трудоёмкое производство

Больше элементов — больше потерь света и масса объектива

Покрытия чувствительны к углам падения и требуют вакуумных технологий

Параксиальное приближение не работает для широких пучков и больших углов

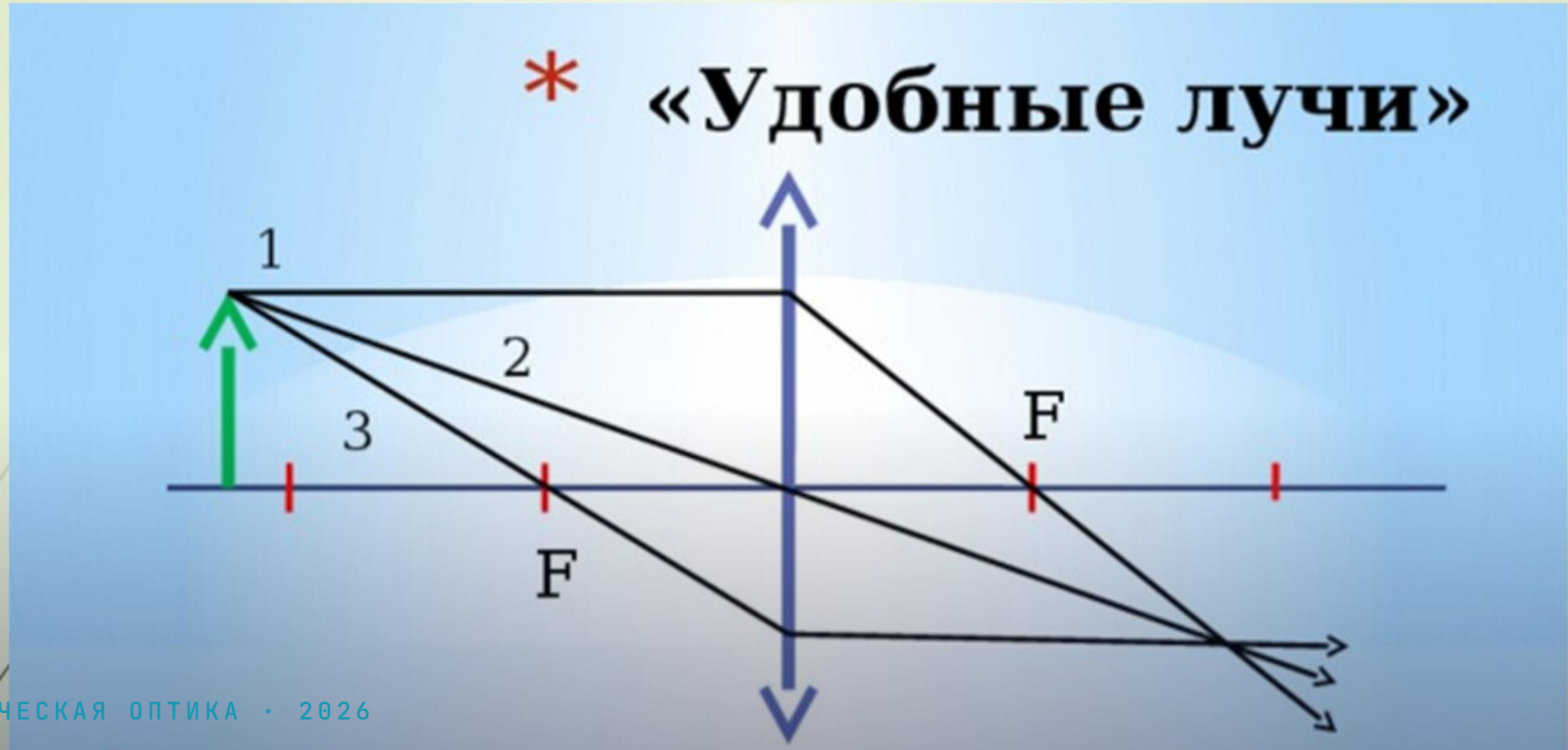
СОВРЕМЕННЫЙ ЭТАП

Метаповерхности и плоская оптика

Метаповерхности — массивы наноструктур, управляющие светом на субволновом уровне. В 2026 году они переходят от статичных элементов к программируемым и динамически управляемым: плоские линзы для камер смартфонов, антенны для спутниковой связи, поляризационная визуализация.

- Плоская оптика заменяет громоздкие системы: тоньше, легче, дешевле в масштабировании





ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА · 2026

Freeform-оптика: поверхности без осевой симметрии

Свободные формы объединяют несколько оптических функций в одном элементе — системы становятся компактнее и легче

Источник: Electro Optics, 2026; Light: Science & Applications, 2026

GPU-ускорение трассировки лучей: миллионы лучей за минуты

10–50×

Ускорение трассировки

+10…+50×

1 млн

Лучей в модели

минуты, не часы

2026

Версия LightTools

GPU-ускорение



GPU-ускорение сокращает цикл проектирования: больше итераций и точнее модель паразитного света.

Источник: Keysight, LightTools 2026

ФИНАЛ

Спасибо!

Законы геометрической оптики работают и сегодня: метаповерхности, freeform, фотонные чипы.