

Лекция 6 **ТЕРМООПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ
ПРИ СВЕРХВЫСОКИХ
ИНТЕНСИВНОСТЯХ СВЕТА**

Вопросы:

- 1. Оптический пробой среды.**
- 2. Ударные и тепловые нелинейные эффекты. Понятие о силовой оптике. Лучевая прочность.**

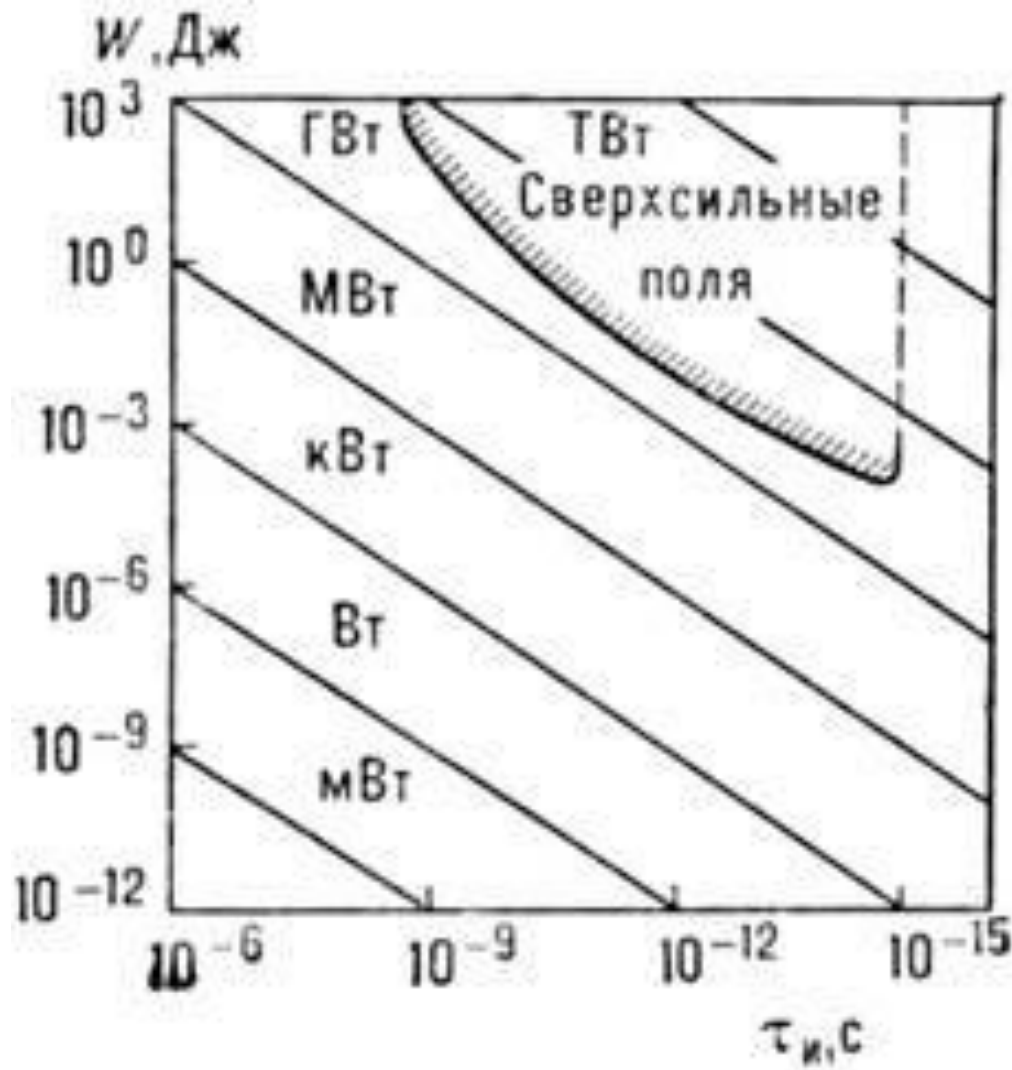
Эффективные мощности и интенсивности излучения различных лазеров

<i>Энергетические параметры</i>	<i>He-Ne лазер непрерывный режим</i>	<i>CO₂ лазер импульсный режим</i>	<i>YAG лазер мод. добротн. и фокусировка</i>	<i>Предельные возможности:</i>
$P^* = \frac{W}{\tau}$	$P \sim 10^{-2} \text{ Вт}$	$P^* \sim 10^6 \text{ Вт}$	$P^* \sim 10^7 \text{ Вт}$	$P^* \sim 10^{13} \text{ Вт}$
$I^* = \frac{P^*}{S} = \frac{W}{\tau S}$	$I \sim 0.1 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$	$I^* \sim 10^7 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$	$I^* \sim 10^{10} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$	$I^* \sim 10^{18} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$
	$(I \sim I_{\text{солн}})$	$\tau \sim 10^{-7} \text{ с}$ $r \sim 10^{-1} \text{ см}$	$\tau \sim 10^{-8} \text{ с}$ $r \sim 10^{-2} \text{ см}$	$\tau \sim T \sim 10^{-15} \text{ с}$ $r \sim \lambda \sim 10^{-3} \text{ см}$

При сверхвысоких интенсивностях излучения современных лазеров локальные параметры напряженности электромагнитного поля превышают внутриатомные значения:

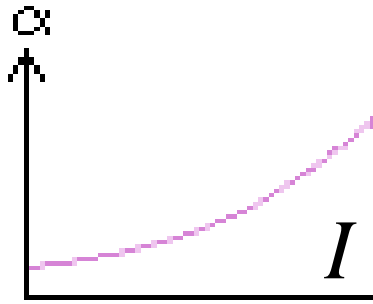
$$E > E_{\text{ат}} \left(\approx 10^{11} \frac{\text{В}}{\text{М}} \right)$$

Область сверхсильных световых полей



$\tau_{\text{и}}$ – длительность импульсов излучения.

Оптический пробой – это быстропротекающий необратимый процесс превращения среды из прозрачной в сильно поглощающую под действием интенсивного излучения, сопровождающийся разрушением структуры этой среды.



Возникновение оптического пробоя связано с переходом от линейного к нелинейному поглощению, которое может оказаться на несколько порядков выше.

$$I(z) = I_0 \cdot \exp\left(-\int \alpha(z) dz\right), \quad \text{где } \alpha \sim I^K.$$

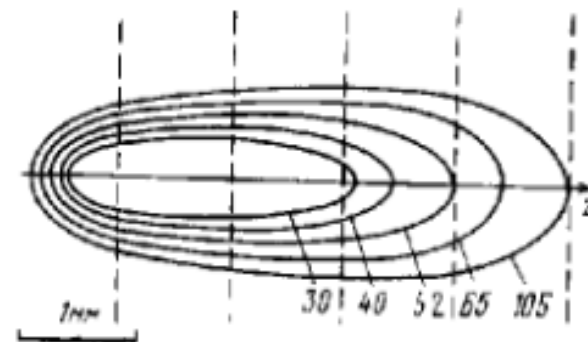
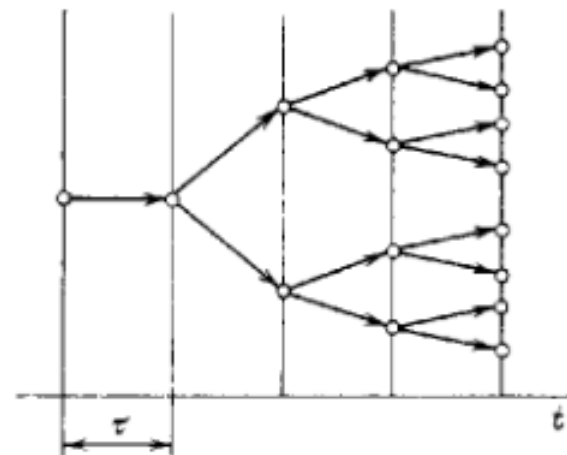
Физические процессы, сопровождающие оптический пробой в твердом теле

Ионизация атомов кристаллической решетки и резкое увеличение концентрации свободных электронов

Вырывание связанных электронов валентной зоны под действием ускоренных свободных электронов

Развитие электронной лавины, приводящей к образованию критической концентрации электронов для излучения заданной частоты

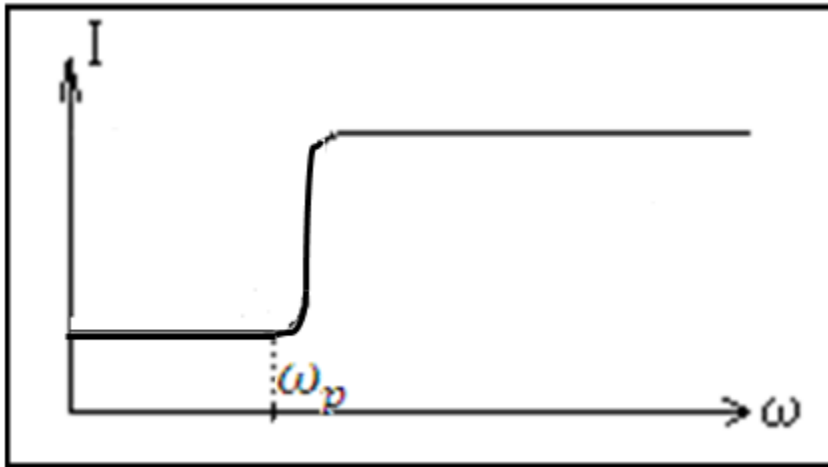
Нелинейное поглощение излучения и быстрый нагрев среды, приводящий к повышению давления и разрушению



$$\tau_l = 30 \text{ нс}$$

Эффект «затемнения» оптической среды

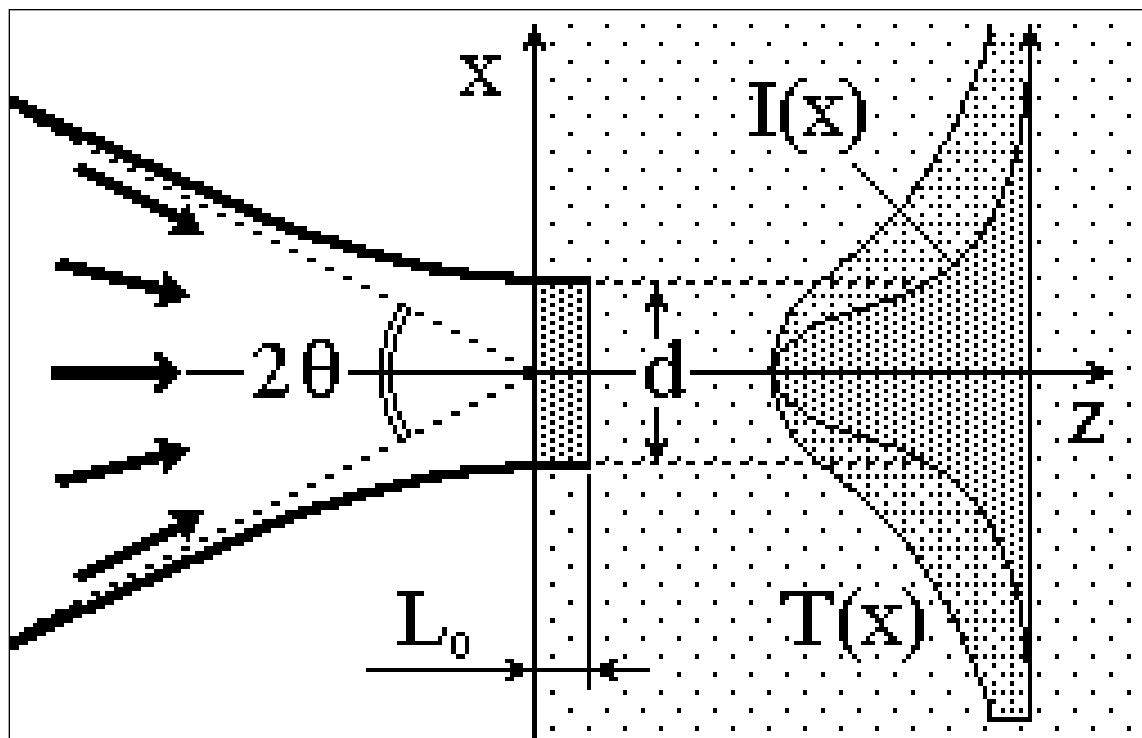
В оптической среде под действием высокоинтенсивного светового поля образуется плотная плазма, сильно поглощающая падающее на нее излучение.



$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n_0}{\epsilon_0 m}} \quad \text{— плазменная частота.}$$

При достижении критической концентрации свободных электронов $n_{0 \text{ кр}}$ и выполнении условия $\omega = \omega_p$ плазма становится непрозрачной для излучения вследствие сильного поглощения.

Тепловое действие света



Сильное поглощение приводит к образованию интенсивного распределенного источника тепла в области, ограниченной диаметром перетяжки d сфокусированного пучка и глубиной поглощения L_0 .

$$L_0 = \frac{1}{\langle \alpha \rangle}$$

Быстрый нагрев среды при оптическом пробое обусловлен предельной концентрацией световой энергии в пространстве (*фокусировка*) и во времени (*компрессия*).

Теплофизический механизм разрушения

Теоретическое описание и моделирование теплового разрушения основано на решении *уравнения теплопроводности*.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{(1-R)}{L_0} I(z)$$
$$\Delta T = \frac{(1-R)W}{\rho c_p S L_0} = \frac{(1-R)I\tau}{\rho c_p L_0}$$

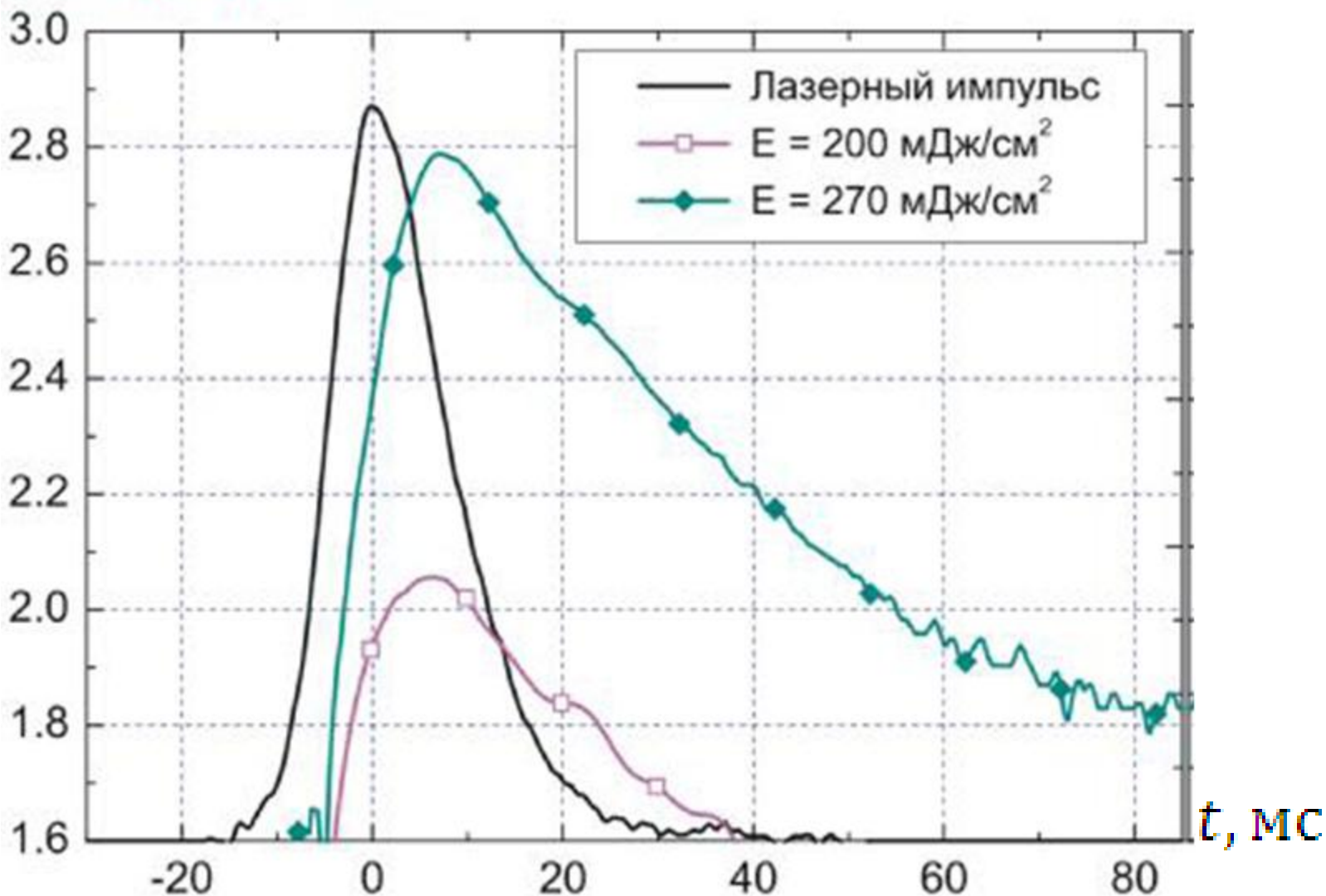
k_T , R – *коэфф-ты теплопроводности и отражения света*.

Пример. При плотности энергии излучения $W/S = 0,1$ МДж на квадр. метр и длительности облучения $\tau = 10$ нс локальное повышение температуры поглощающей области $\Delta T \sim 10000$ К.

При таких температурах в кварцевом стекле возникают механические напряжения, превышающие предел прочности, происходит растрескивание и оплавление.

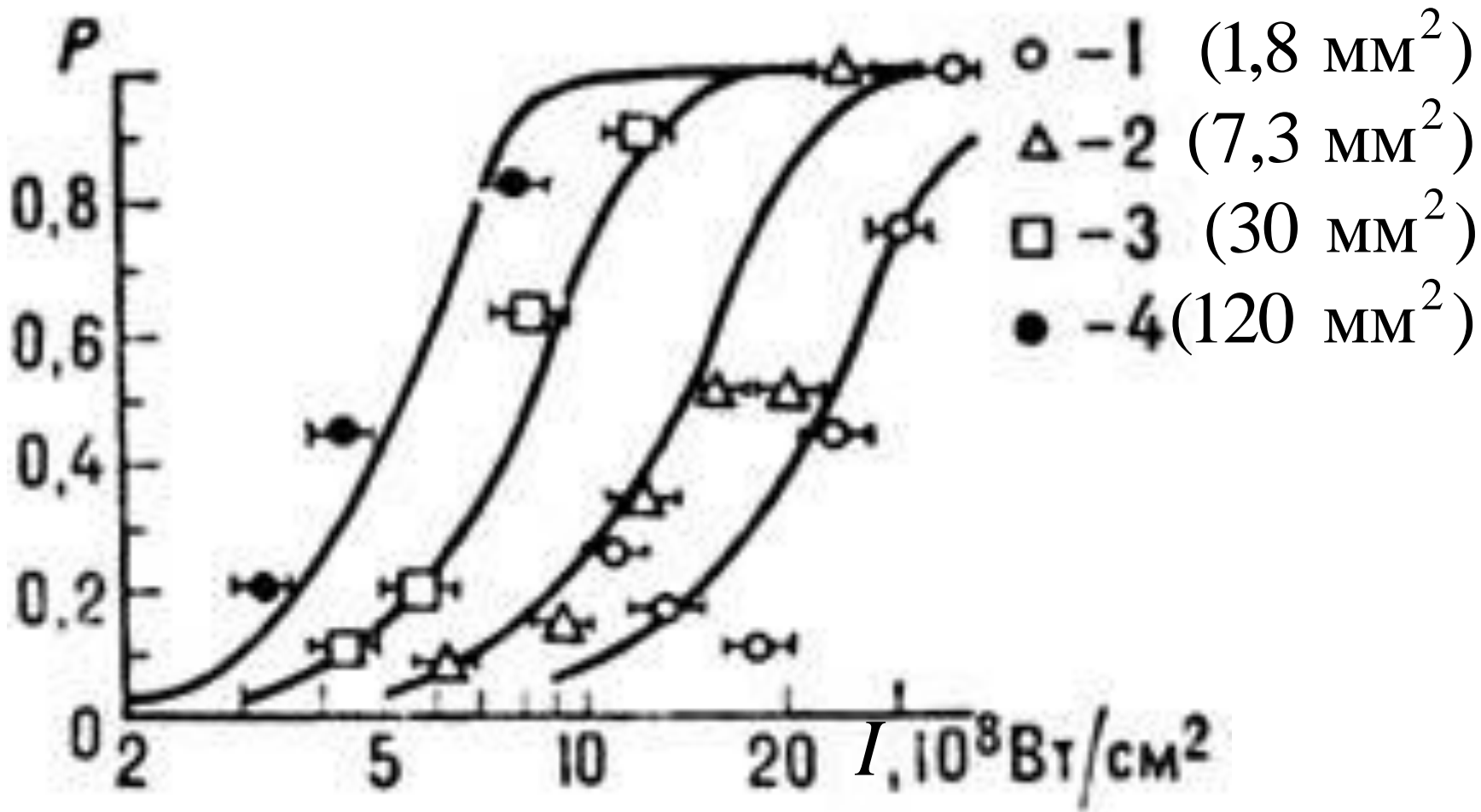
Временная зависимость температуры поверхности

Температура, 10^3 К

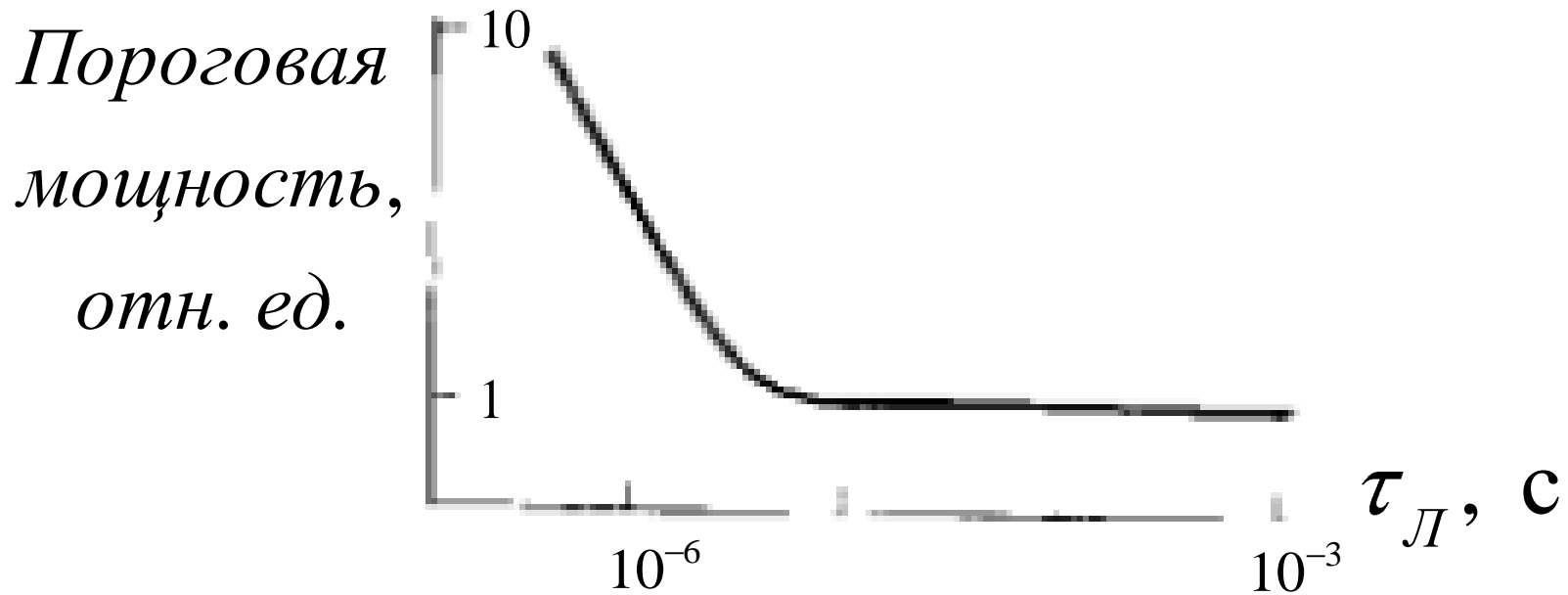


Длительность лазерного импульса показана в другом масштабе.

Вероятность оптического пробоя кварцевого стекла



Влияние длительности облучения оптического кристалла на пороговую мощность



*Зависимость пороговой мощности разрушения
кристалла рубина от длительности импульса
лазерного излучения.*

С уменьшением длительности внешнего светового поля сверхвысокой интенсивности повышается стойкость к оптическому пробую.

Параметры, влияющие на возникновение оптического пробоя

*Параметры среды
(ширина запрещенной
зоны, температура,
облучаемый объем и др.)*

*Параметры излучения
(частота, пространст-
венное и временное рас-
пределение, длитель-
ность импульса)*

В общем случае пороговые значения интенсивности излу-
чения, вызывающие оптический пробой, лежат в широком
диапазоне $10^{13} \dots 10^{16} \frac{\text{Вт}}{\text{М}^2}$.

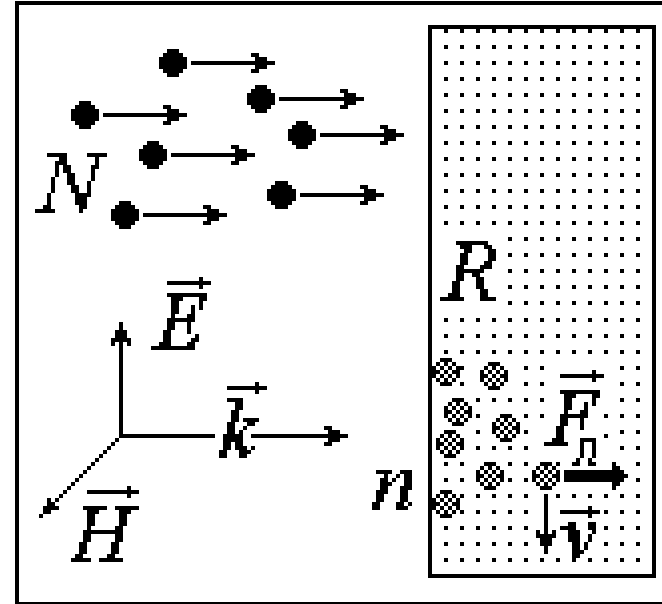
Сверхвысокое световое давление

Давление света

$$\mathcal{P} = NR 2\hbar \frac{\omega}{c} + N(1-R)\hbar \frac{\omega}{c}$$

$$\mathcal{P} = \int_0^{\infty} n F_n dz = \int_0^{\infty} n \frac{e}{c} v H dz$$

$$\mathcal{P} = \varpi (1 + R)$$



$\bar{W} = \frac{I}{c}$ – *объемная плотность энергии излучения.*

При $I = 10^{14} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, $R = 1$ находим: $\mathcal{P} \sim 6,7$ атм.

Сверхвысокое световое давление вызывает появление ударных механических воздействий, дополняющих тепловое разрушение.

Элементы силовой оптики

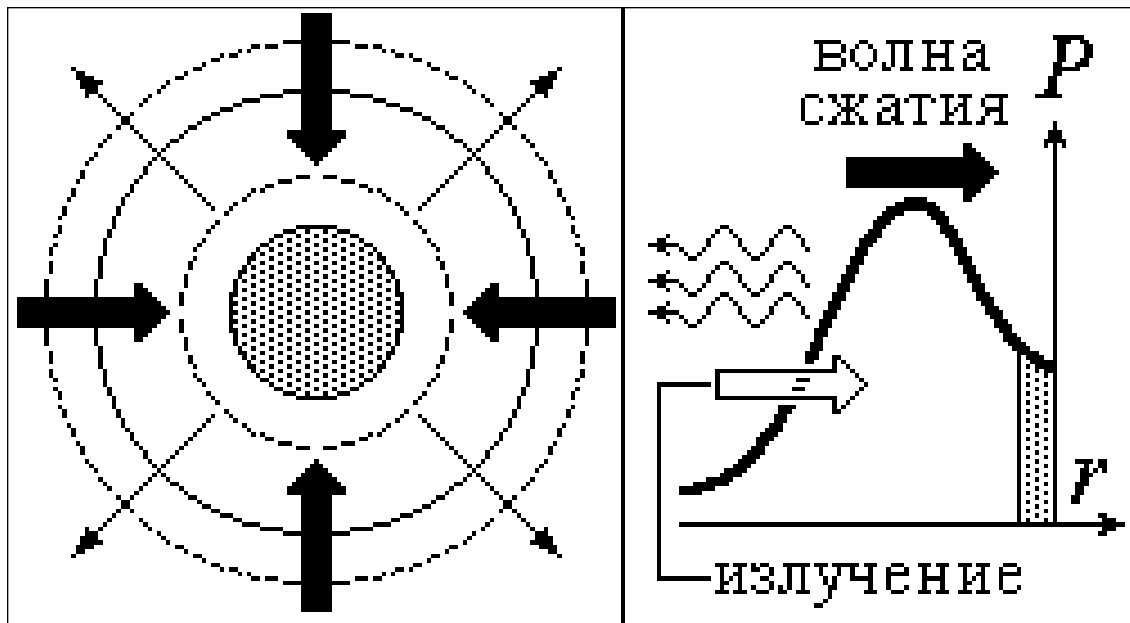
В рамках *силовой оптики* рассматриваются нелинейные эффекты и их технологические применения, связанные с прямым энергетическим воздействием (тепловым или ударным) излучения сверхвысокой интенсивности.

Возникновение сил, на много порядков превосходящих силы сверхвысокого светового давления

Конвективные силы
(связаны с нагревом среды и обратным воздействием потоков жидкости или газа на тело)

Радиометрические силы (возникают в разреженных газах, поскольку скорость молекул после соударения с нагретой поверхностью больше, чем начальная).

Светореактивные силы (обусловлены разлетом вещества с поверхности облучаемого тела)



Фокусировка лазерных импульсов, приводящая к разогреву и сжатию вещества за счет светореактивного давления, используется для осуществления лазерного термоядерного синтеза. В современных установках достигается интенсивность $I = 10^{20} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, при этом испарение мишени приводит к образованию волны сжатия, разогревающей плазму до температур ~ 10 миллионов К за время ~ 1 нс.

**Исследование процессов
выделения энергии в веществе
под действием интенсивных
световых потоков**

**Экспериментальное
определение параметров лучевой
прочности оптических
материалов**

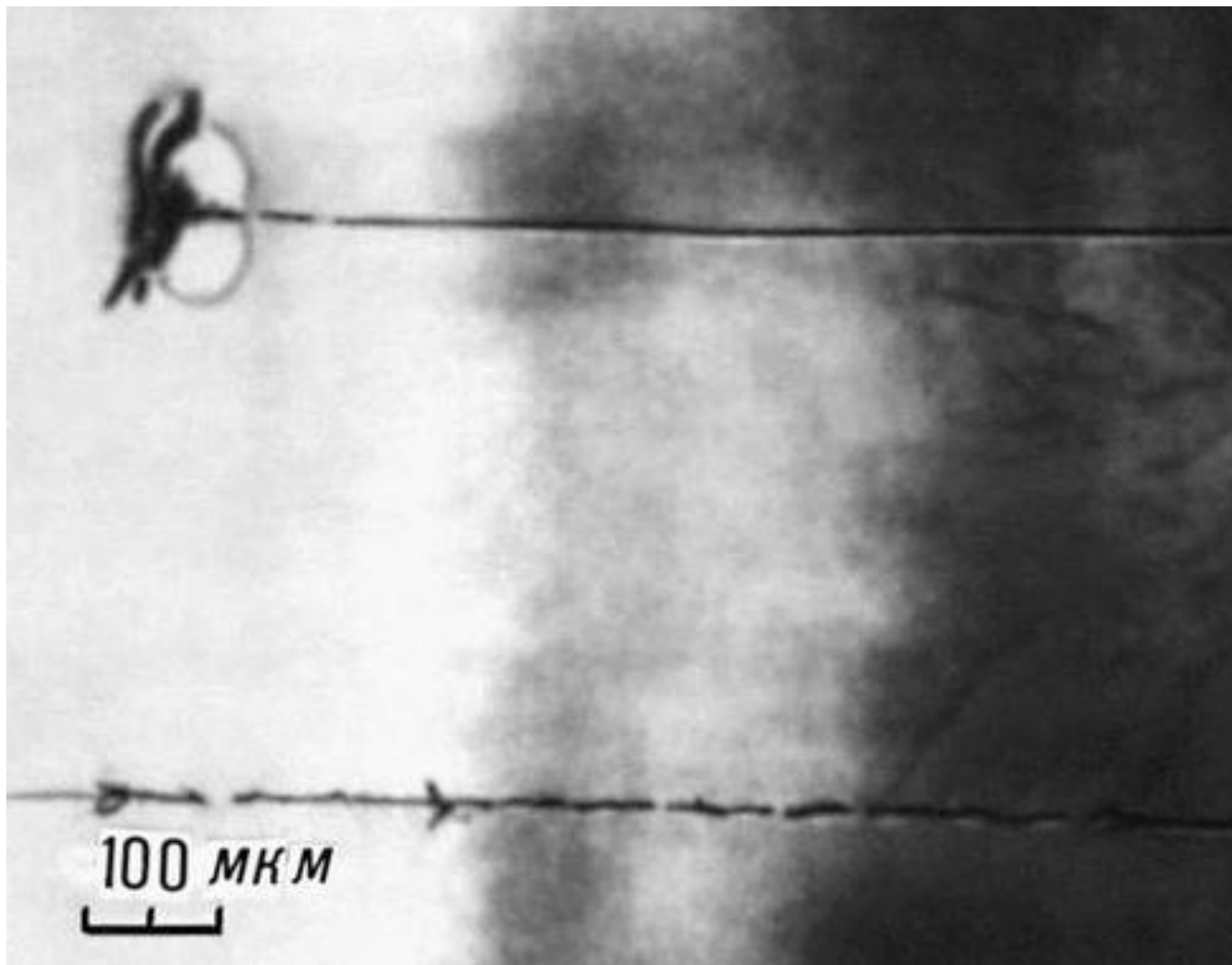
**Изучение влияния
нелинейных оптических эффектов
на характер разрушения
материалов**



**А.М.Бонч-Бруевич
(1916 – 2006)**

**Параметры лучевой проч-
ности – интенсивность,
энергия, длительность из-
лучения, при которых на-
блюдается разрушение того
или иного типа (оптический
пробой, плавление и т.д.).**

Нитевидные разрушения в стекле
(случай нарушения лучевой прочности)



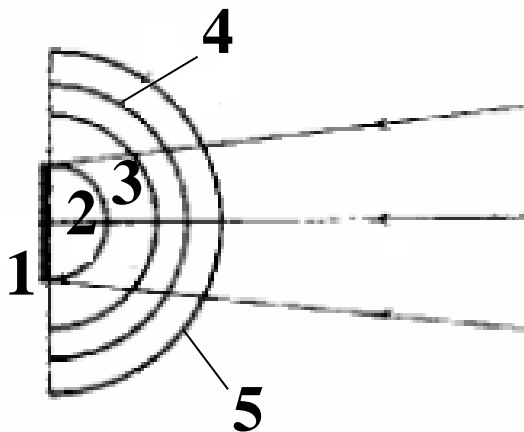
Образование плазменного факела

При большой интенсивности светового излучения имеем:

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{Энергия излучения,} \\ \text{поглощенная поверх-} \\ \text{ностью тела} \\ \hline \end{array} > \begin{array}{|c|} \hline \text{Энергия} \\ \text{плавления} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{Энергия} \\ \text{испарения} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{Энергия} \\ \text{ионизации} \\ \text{вещества} \\ \hline \end{array}$$

$\tau_{\text{ион}} \approx 10^{-9} \text{ с}$

Явление образования и разлета плазмы при взаимодействии излучения сверхвысокой интенсивности с твердым телом называется *плазменным факелом*.



1 – нагреваемая излучением поверхность тела; 2 – граница плотной непрозрачной плазмы; 3 – граница светящейся рекомбинирующей плазмы; 4 – поверхность нулевого потенциала; 5 – фронт электронного облака.

Развертка и фотография плазменного факела, генерируемого лазерным излучением

