

# Лазеры

ООО «НПП  
«ИНЖЕКТ»

# Определение лазера

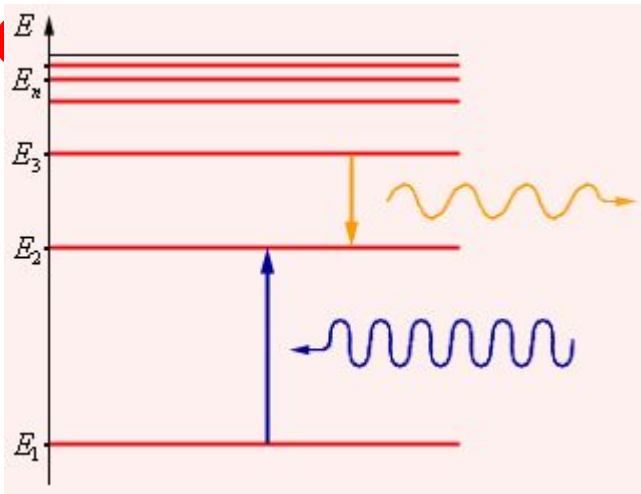
**Лазер** (от англ. light amplification by stimulated emission of radiation – усиление света посредством вынужденного излучения) – **генератор электромагнитного излучения в оптическом диапазоне, основанный на использовании индуцированных переходов**.



# Теория строения атомов

## Атом

В



Частота излучения

$$\nu_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h}$$

$$\lambda = \frac{c}{n\nu}$$

Длина волны — расстояние между двумя ближайшими друг к другу точками в пространстве, в которых колебания происходят в одинаковой фазе

**Первый постулат Бора** (постулат стационарных состояний): атомная система может находиться только в особых стационарных или квантовых состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия  $E_n$ . В стационарных состояниях атом не излучает.

Атом характеризуется системой *энергетических уровней*, каждый из которых соответствует определенному стационарному состоянию.

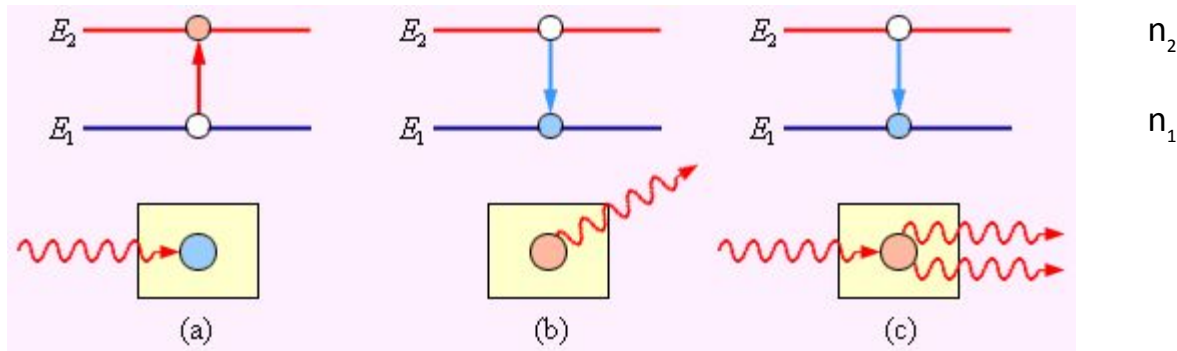
**Второй постулат Бора** (правило частот): **при переходе** атома из одного стационарного состояния с энергией  $E_n$  в другое стационарное состояние с энергией  $E_m$  **излучается или поглощается квант, энергия** которого равна **разности энергий** стационарных состояний:

$$h\nu_{nm} = E_n - E_m$$

где  $h$  — постоянная Планка

# Переходы между энергетическими состояниями атома

Переходы между энергетическими уровнями могут быть связаны с поглощением или испусканием фотонов – квантов света



Поглощение

Спонтанный  
испускание

**Индукцированный или  
вынужденный переход**  
– квантовый переход под  
действием внешнего  
электромагнитного поля

При **вынужденном** переходе в результате взаимодействия атома с фотоном атом испускает еще один **фотон той же самой частоты, распространяющийся в том же направлении**. Атом излучает электромагнитную волну, у которой частота, фаза, поляризация и направление распространения точно такие же, как и у первоначальной волны. В результате вынужденного испускания фотонов амплитуда волны, распространяющейся в среде, возрастает. В результате взаимодействия атома с фотоном, частота которого равна частоте перехода, появляются два совершенно одинаковых фотона-близнеца

Согласно распределению Больцмана, при термодинамическом равновесии большее количество атомов вещества будет находиться в нижнем энергетическом состоянии. Некоторая часть атомов будет находиться и в верхнем энергетическом состоянии, получая необходимую энергию при столкновениях с другими атомами.

Обозначим населенности нижнего и верхнего уровней соответственно через  $n_1$  и  $n_2 < n_1$ .

$$n_2 < n_1$$

При распространении резонансного излучения в такой среде будут происходить все три процесса.

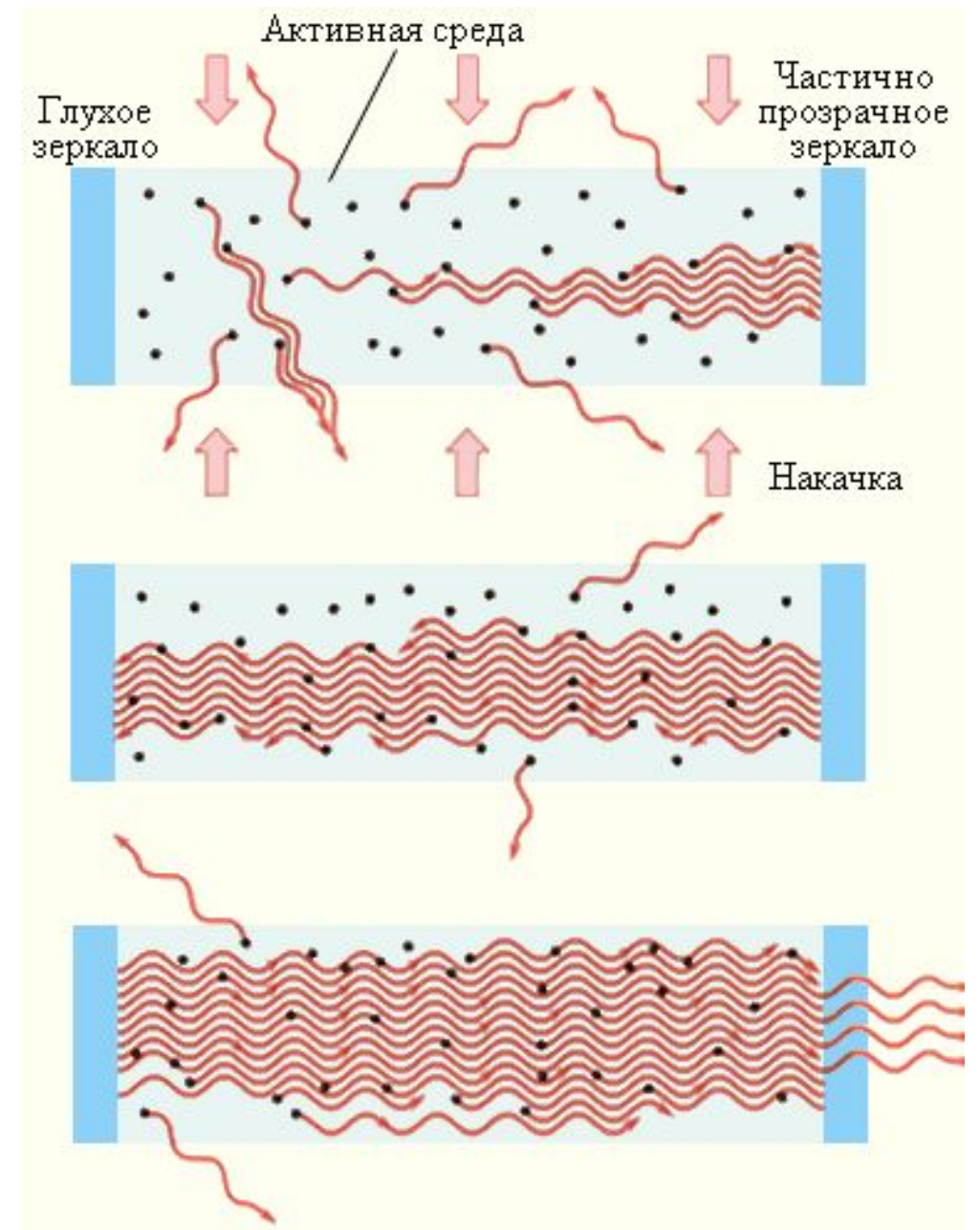
Процесс (a) поглощения фотона невозбужденным атомом и процесс (c) индуцированного испускания кванта возбужденным атомом имеют одинаковые вероятности.

Количество вынужденных переходов пропорционально числу атомов в возбужденном состоянии  $n_2$ , а также интенсивности внешнего излучения

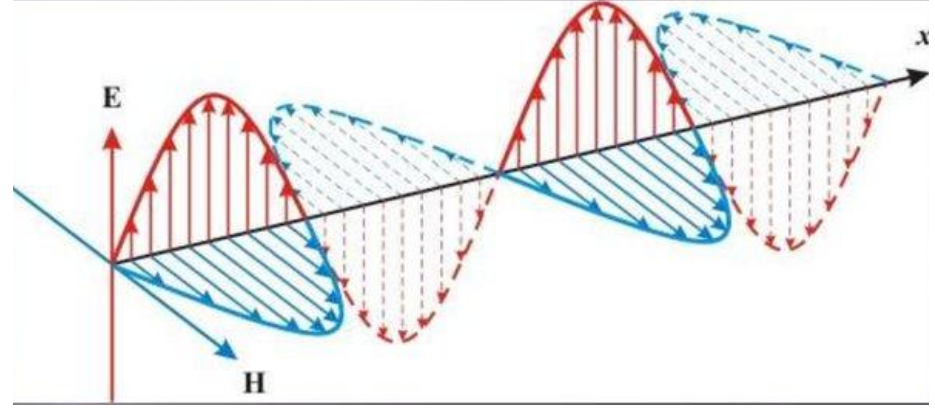
Так как  $n_2 < n_1$  поглощение фотонов будет происходить чаще, чем индуцированное испускание. В результате прошедшее через слой вещества излучение будет ослабляться.

Чтобы проходящая через слой вещества волна усиливалась, нужно искусственно создать условия, при которых  **$n_2 > n_1$** , т. е. создать **инверсную населенность уровней**

# Схематичное изображение лазера

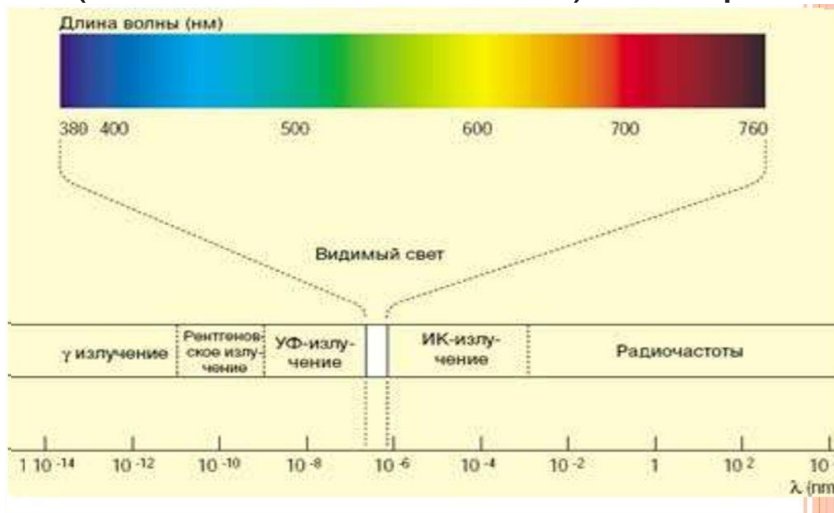


# Излучение



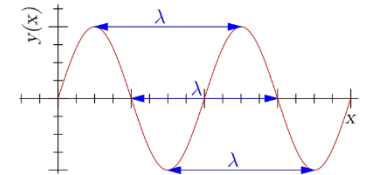
**Излучение** — это процесс испускания и распространения энергии в виде волн и частиц. (электромагнитное, ионизирующее, гравитационное, Хокинга)

**Электромагнитное излучение** — распространяющееся в пространстве возмущение (изменение состояния) электромагнитного поля.



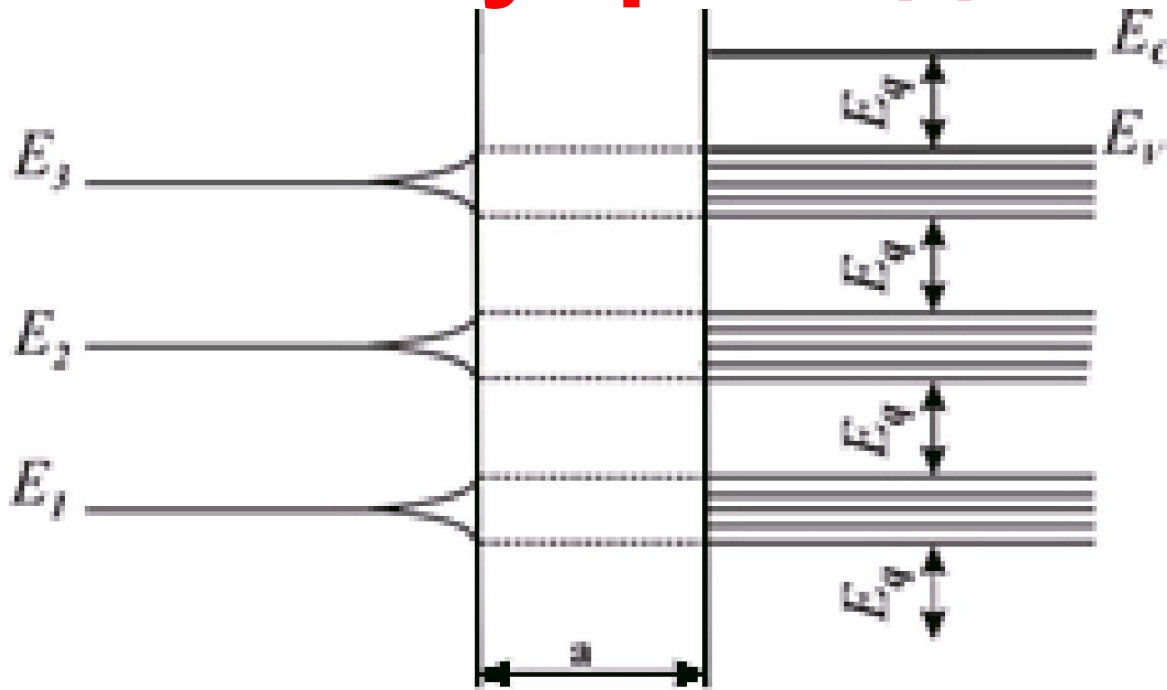
**Частота** — количество повторений (циклов) или возникновения событий (процессов) в единицу времени

**Длина волны** — расстояние между двумя ближайшими друг к другу точками в пространстве, в которых колебания происходят в одинаковой фазе



**Мощность излучения** – отношения количества излучаемой энергии к отрезку времени в течении которого продолжалось излучение.

# Зонная структура полупроводников



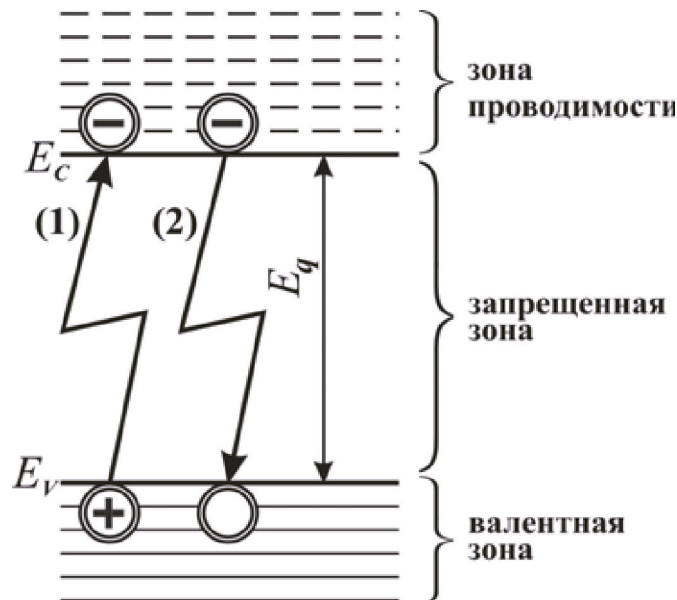
Наивысшая из разрешённых энергетических зон, в которой при температуре 0 все энергетические состояния заняты электронами, называется валентной зоной  $E_v$ , следующая за ней — зоной проводимости  $E_c$ .

При **сближении атомов** энергетические уровни атомов  $E_1$ ,  $E_2$  и  $E_3$  начинают взаимодействовать друг с другом, образуя **зоны энергетических уровней**. В результате твердое тело можно представить в виде **зонной диаграммы**, в которой разрешенные для движения электронов энергетические зоны чередуются с запрещенными. Причем каждая разрешенная зона состоит, в свою очередь, из множества дискретных энергетических уровней, расстояния между которыми столь малы, что их расположение в зоне можно считать практически непрерывным.

**Ширина запрещённой зоны** — разность допустимых энергий электронов между дном зоны проводимости и потолком валентной зоны.

# Виды полупроводников

## собственный (нелегированный) полупроводник



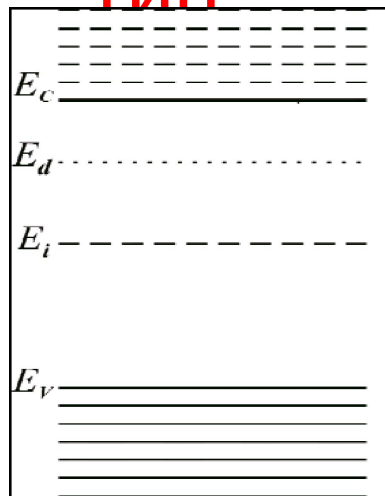
Генерация (1) и  
рекомбинация (2) электронов  
в собственном  
полупроводнике

Повышение температуры вызывает колебательное движение атомов, располагающихся в узлах кристаллической решетки. В результате ковалентные связи между атомами в собственном полупроводнике могут разрываться, что приводит к образованию пары носителей заряда: свободного электрона и незаполненной связи атома, от которого оторвался электрон. Эта незаполненная связь по своим электрическим свойствам подобна свободному положительному заряду, который принято называть **дыркой**.

Перемещение свободного положительного заряда осуществляется за счет того, что незаполненная электроном связь быстро заполняется одним из ионизированных валентных электронов соседнего атома, на месте которого образуется новая дырка. Бесконечное повторение этого процесса создает эффект движущегося положительного заряда, величина которого по абсолютному значению равна заряду электрона.

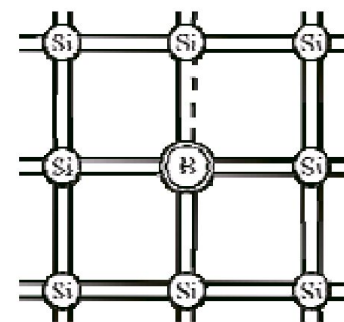
# Примесные полупроводники

n-  
ТИП

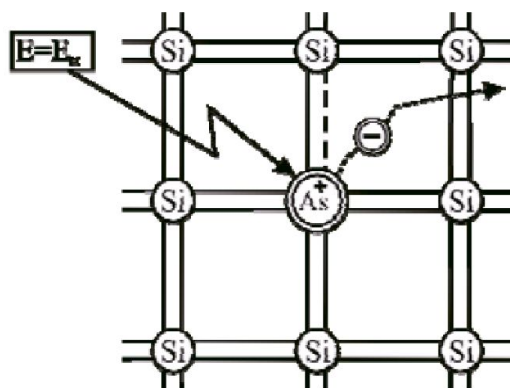
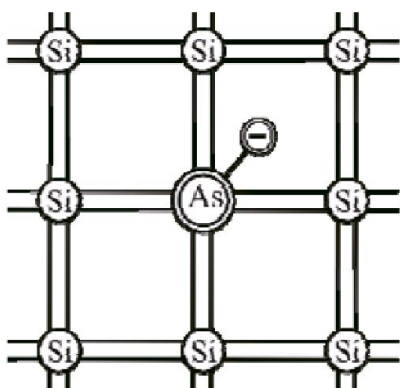
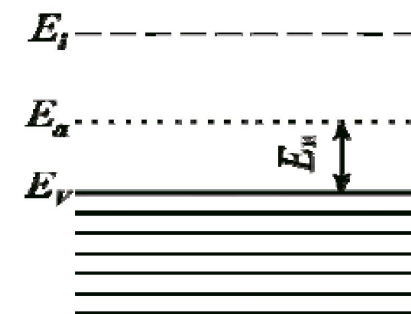
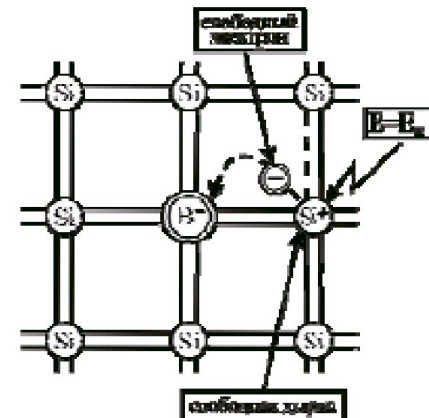


В узел кристаллической решетки четырехвалентного полупроводника кремния (Si) или германия (Ge) будет внедрен атом большей валентности, например, пятивалентный мышьяк (As).

При его взаимодействии с соседними матричными атомами четыре из пяти валентных электронов As вступают в ковалентную связь с четырьмя валентными электронами соседних атомов Si и образуют устойчивую электронную оболочку. Пятый электрон оказывается экранированным от потенциальных полей окружающих атомов, и его связь с валентными электронами значительно ослабляется



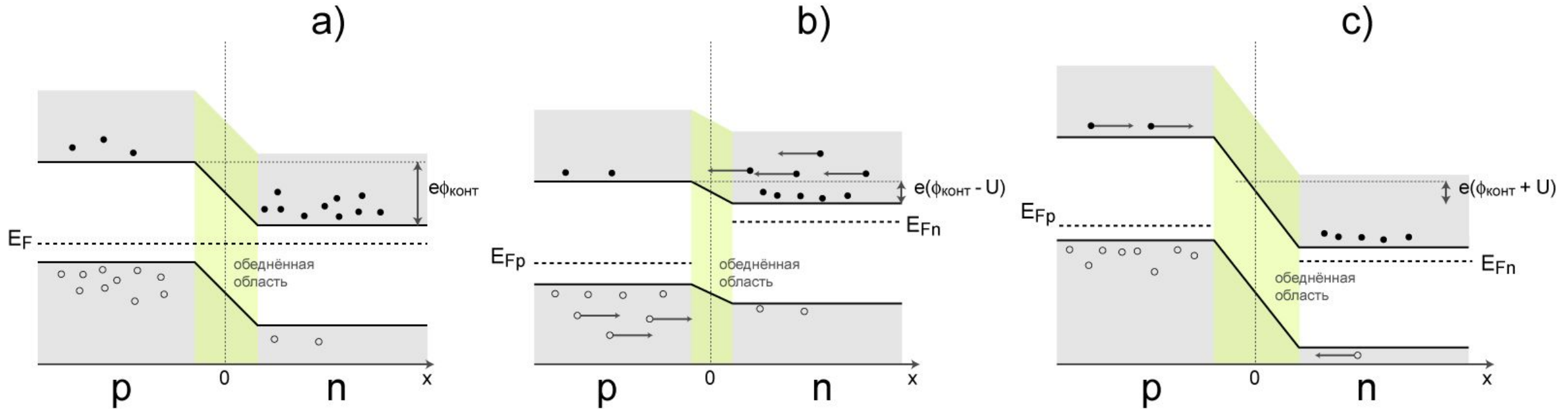
p-



Уже при 77K он отрывается от атома As и переходит в свободное состояние, а атом As приобретает положительный заряд. Однако дырки при этом не образуются, т.к. энергетический уровень атома мышьяка  $E_d$  находится в запрещенной зоне

# р-п-переход

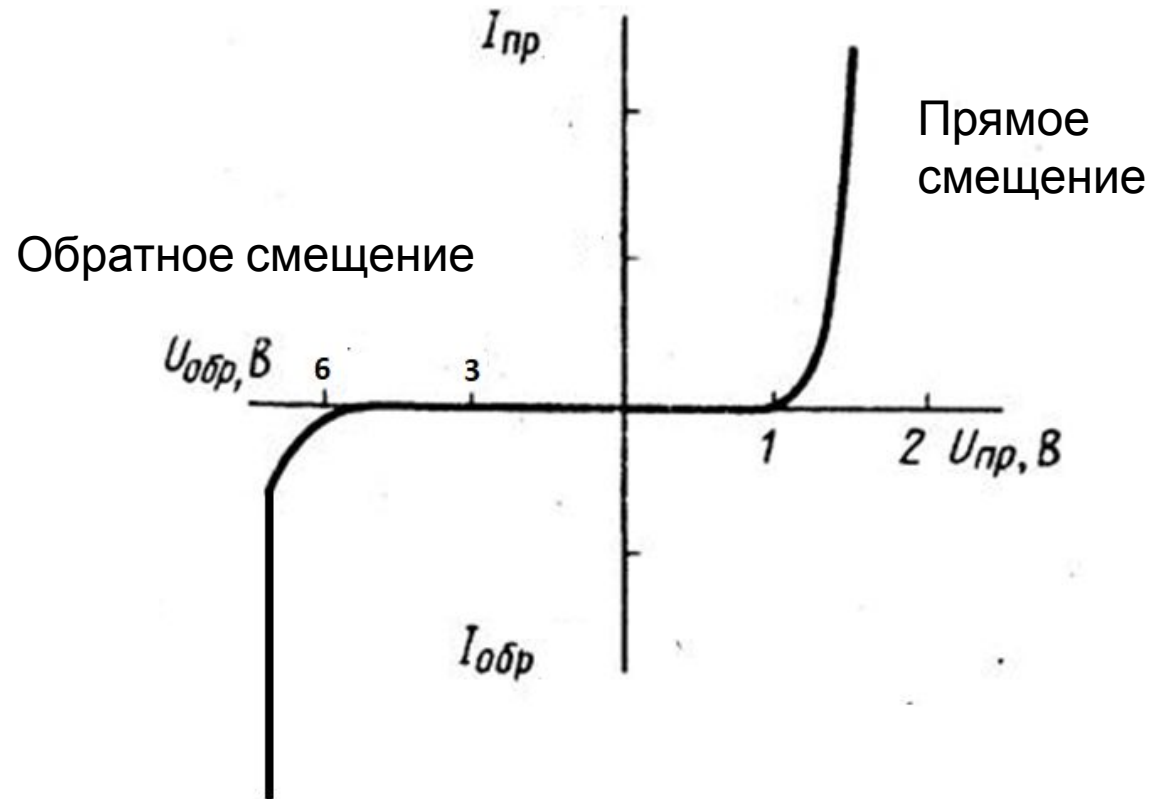
область соприкосновения двух полупроводников с разными типами проводимости



Энергетическая диаграмма р-п-перехода

а) Состояние равновесия    б) при приложенном прямом напряжении    в) При приложенном обратном смещении

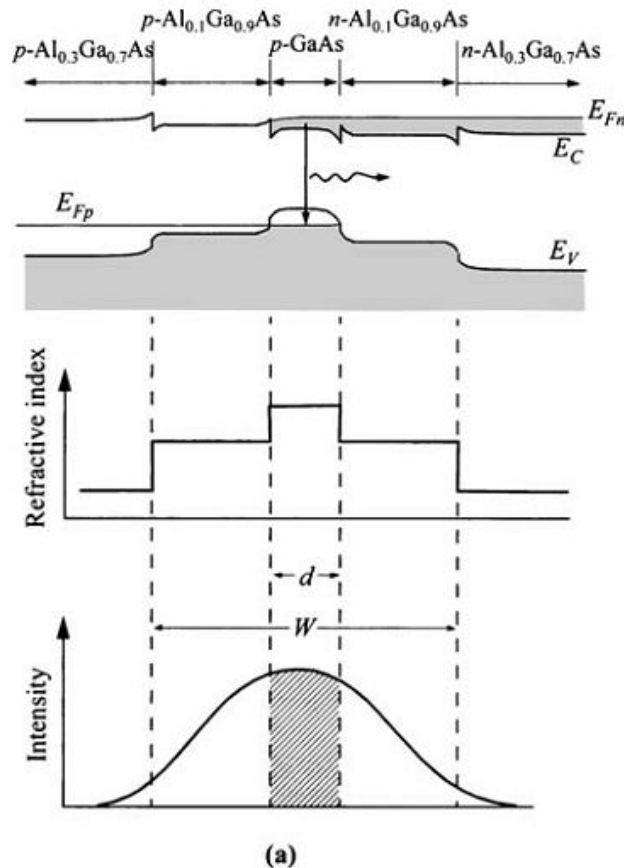
# ВАХ вольт амперная характеристика



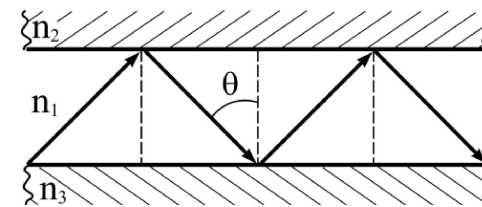
На полупроводниковый лазерный диод запрещается подавать напряжение обратной полярности

Пробой  
!

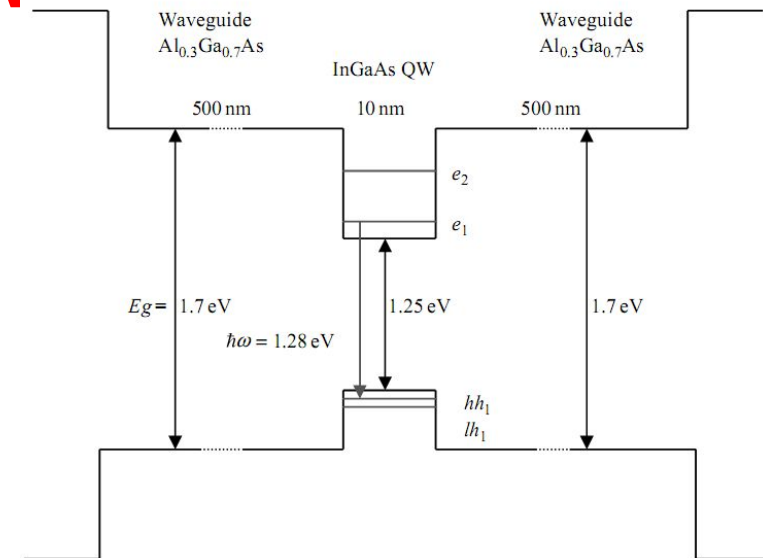
# Пример двойной гетероструктуры с раздельным ограничением и поворотными слоями



Зонная структура, зависимость показателя преломления и интенсивности электромагнитного излучения от координаты



Оптическое ограничение при распространении света в гетероструктуре.

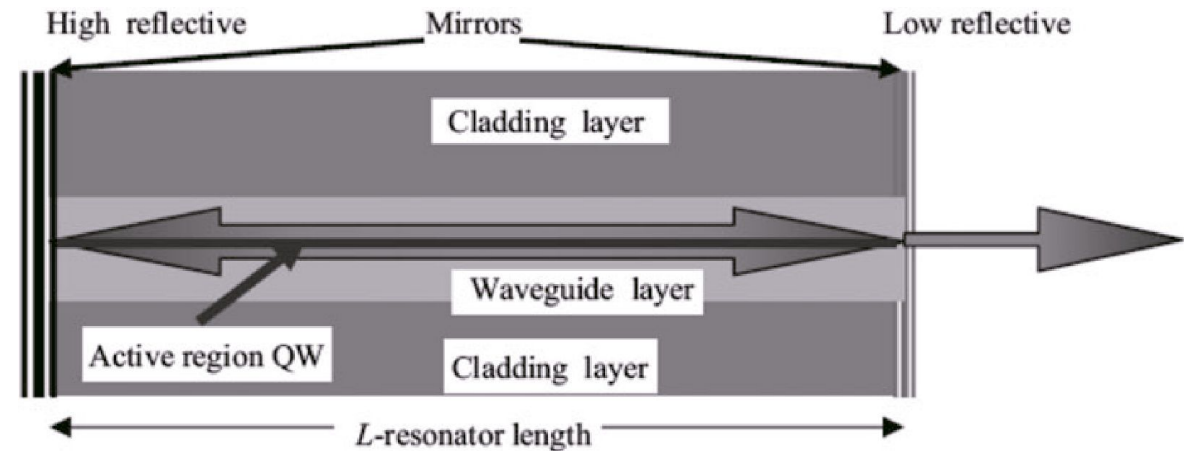
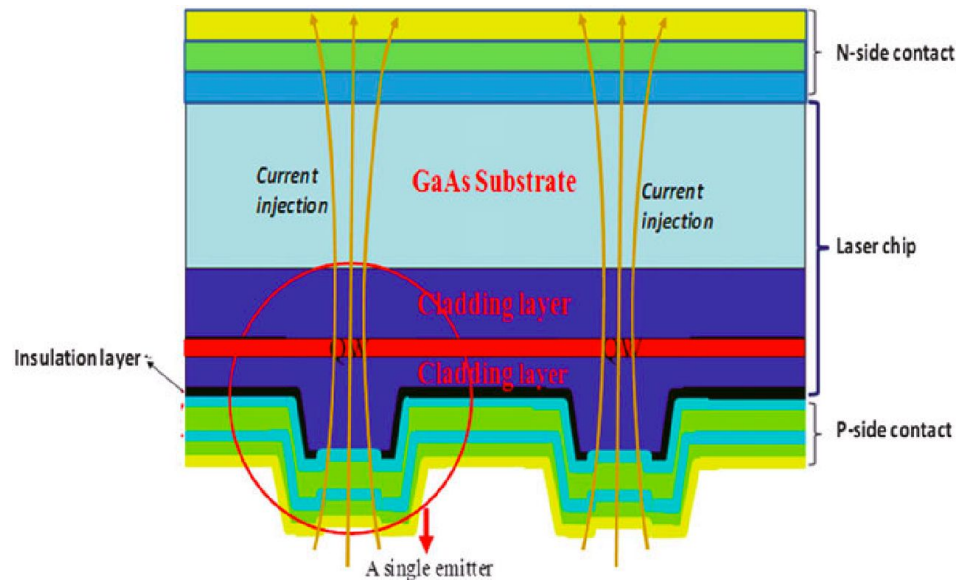
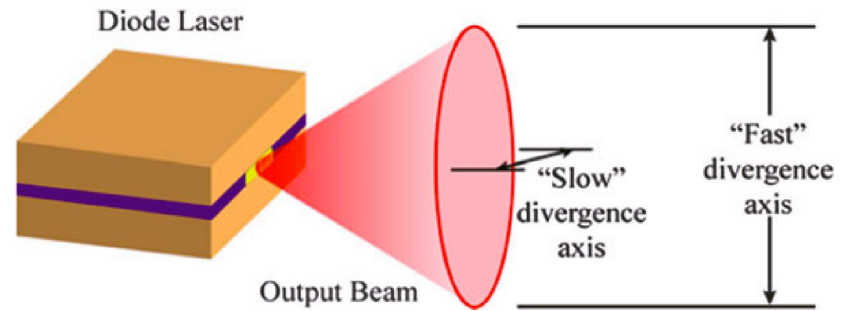


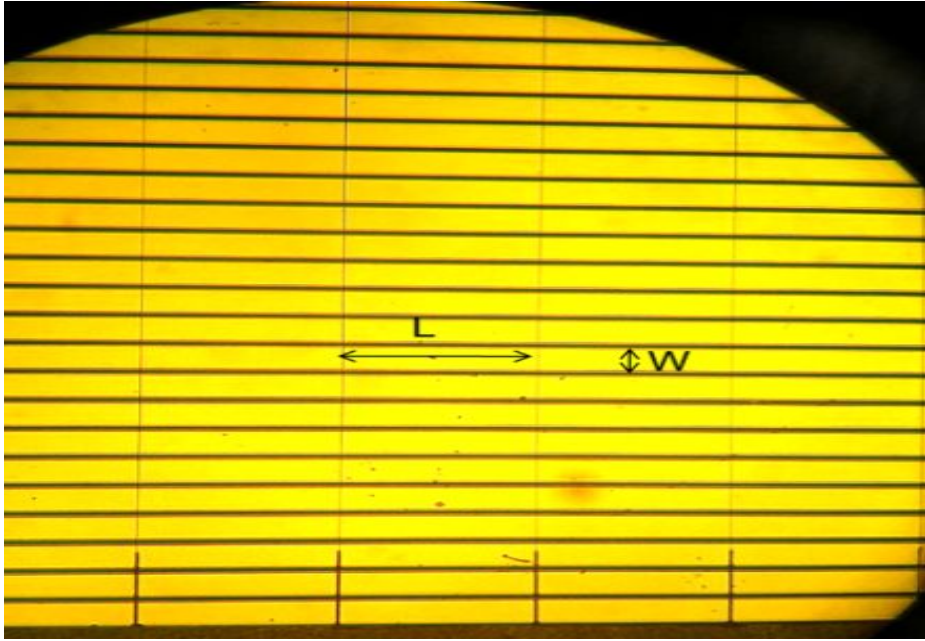
Схематическое изображение энергетической диаграммы

Чтобы происходило усиление излучения необходимо создать условия при котором  $N_n > N_m$  т.е. создать **инверсную населенность уровней**.

Где  $N_m$  - населенность нижнего уровня  
 $N_n$  – населенность верхнего уровня

# Полупроводниковый лазер





# Лазерная структура

В планарном цикле изготовления лазеров на полупроводниковую пластину с выращенными гетерослоями методом вакуумного напыления наносятся слои металлизации.

На торцах линеек (зеркальных гранях кристаллов лазерных линеек) методом вакуумного напыления электронным лучом наносились многослойные диэлектрические покрытия, формирующие зеркальные грани.

На сборочных операциях полученная линейка паяется на различного вида теплоотводы



# Лазеры в ООО «НПП«ИНЖЕКТ»

## Импульсные

е

Длительность  
импульса  
лазерного  
излучения до  
10 микросекунд

Отдел  
импульсных  
источников  
излучения



## Квазинепрерывн

ые

Длительность  
импульса лазерного  
излучения  
от 10 микросекунд  
до  
20 миллисекунд

Отдел  
квазинепрерывны  
х источников  
излучения



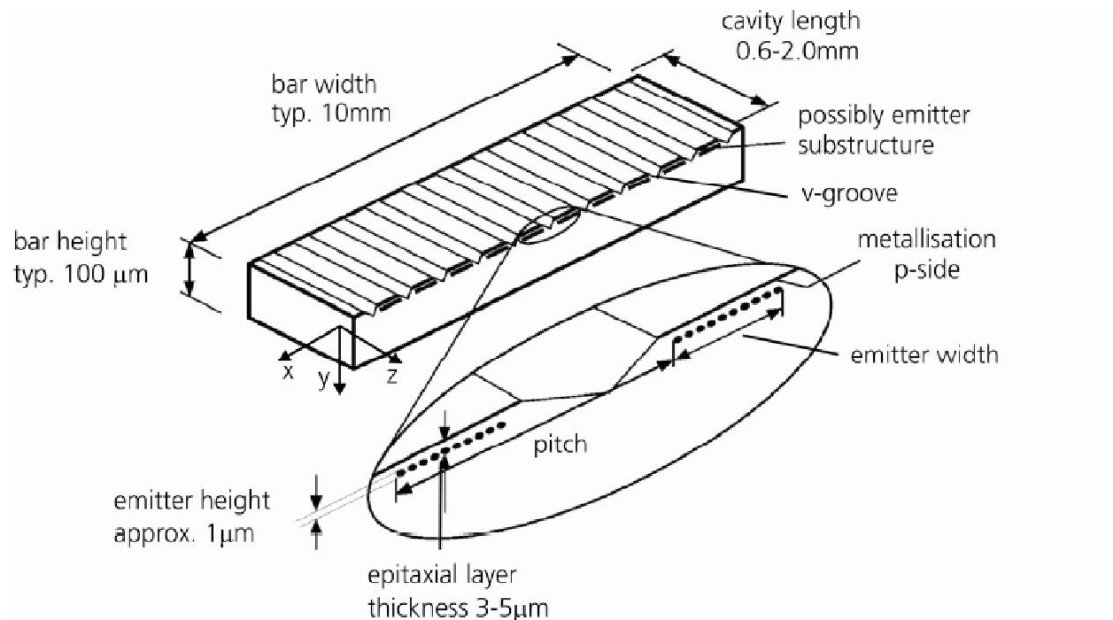
## Непрерывные

Излучение лазера  
происходит  
непрерывно

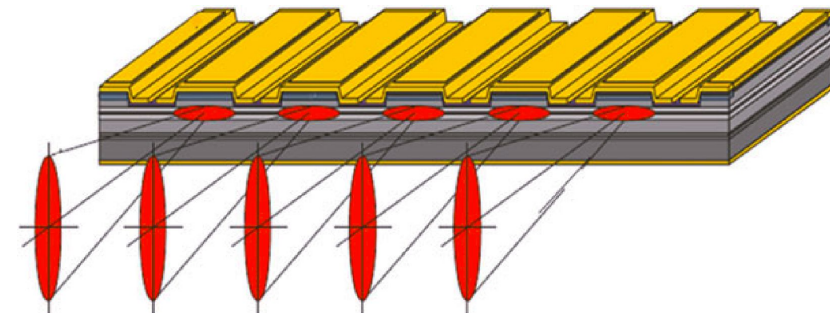
Отдел  
непрерывных  
источников  
излучения



# Линейка лазерных диодов



Схематичное изображение типичной линейки лазерных диодов

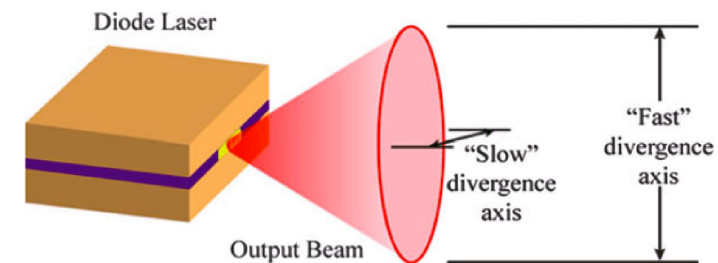


# Параметры полупроводникового лазера

## Ватт-амперная характеристика



$$\lambda = \frac{c}{n\nu}$$



Зависимость **мощности** излучения полупроводникового лазера от **тока накачки** после преодоления порогового тока, имеет **линейное приближение** и описывается следующим выражением

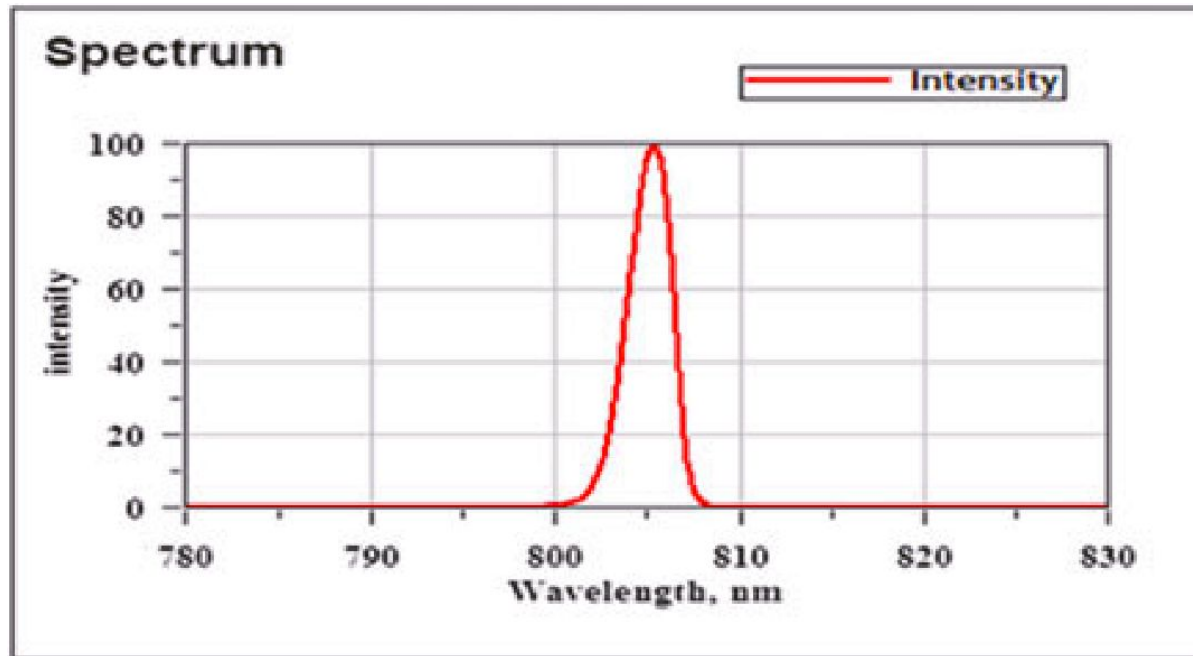
$$P = \eta_D \cdot [I - I_{th}]$$

$I_{th}$  - пороговый ток полупроводникового лазера

$\eta_D$  - дифференциальная эффективность

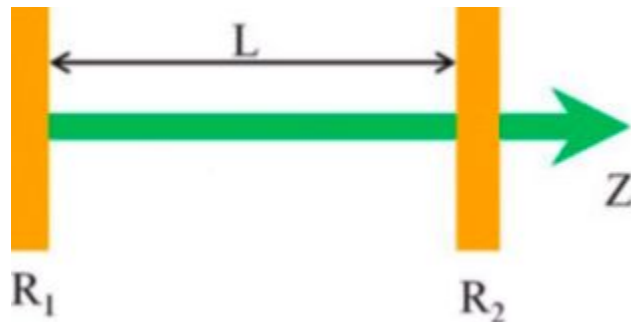
# Параметры полупроводникового лазера

## Спектральные

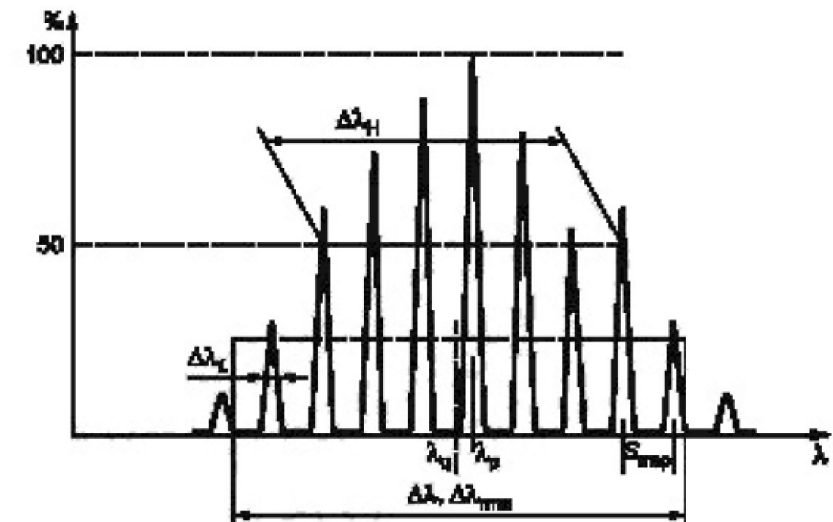


|                         |        |
|-------------------------|--------|
| Peak wavelength(nm)     | 805.92 |
| Centroid wavelength(nm) | 805.77 |
| FWHM(nm)                | 2.82   |
| FW90% Energy(nm)        | 4.43   |

Длина волны огибающей спектра  
центральная длина волны



Резонатор Фабри-Перо  
 $L=1,5$  mm  
Межмодовое расстояние 0,056 nm

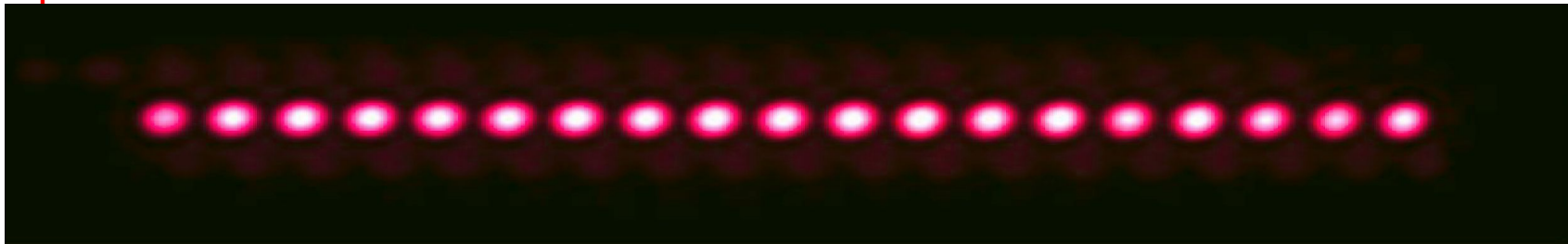


# Параметры полупроводникового лазера

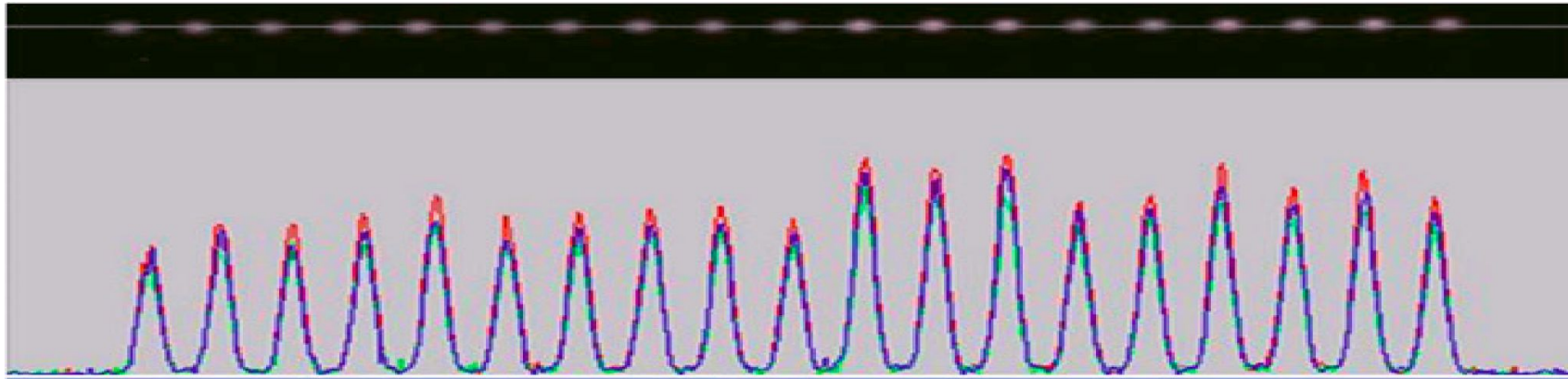
## Ближнее

## поле

Ближнее поле определяется лазерным излучением вблизи выходного зеркала



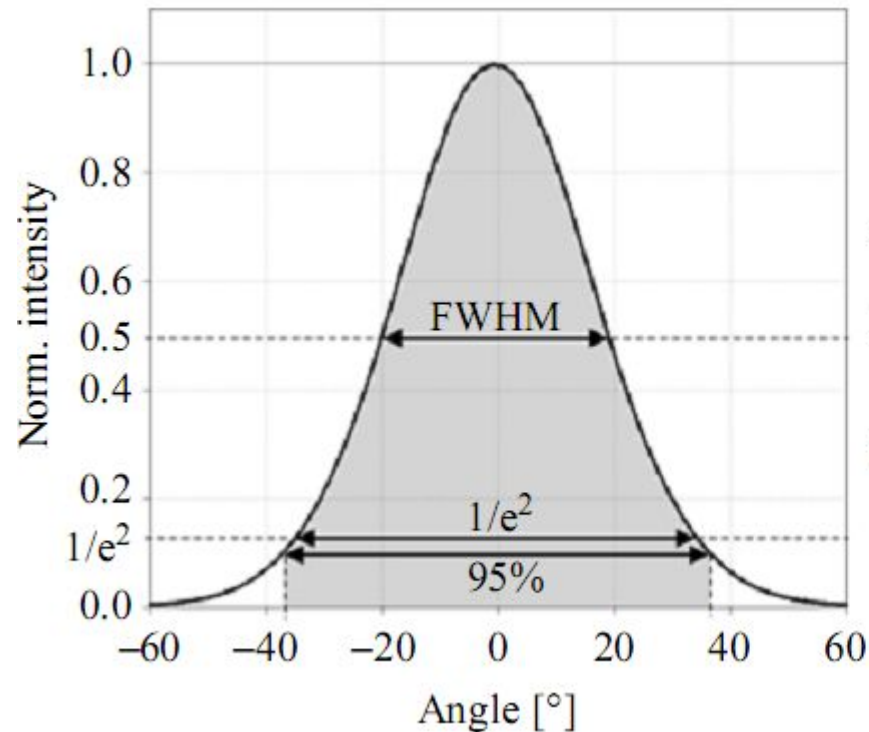
Снимок ближнего поля лазерной линейки



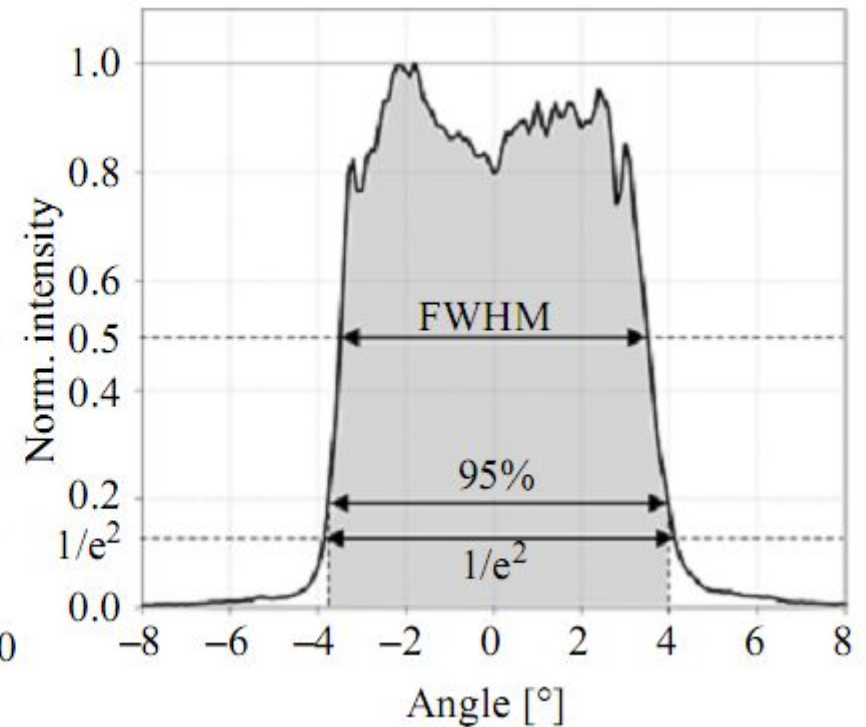
Профиль интенсивности излучения ближнего поля лазерной линейки

# Параметры полупроводникового лазера

Дальнее поле – расходимость излучения



Быстрая ось



Медленная  
ось

Профиль интенсивности излучения дальнего поля лазерной линейки

# Зависимость параметров лазера от температуры

Температурная  
зависимость  
порогового  
тока

$$I_{th}(T) = I_{th}(T_{ref}) \exp\left(\frac{T - T_{ref}}{T_0}\right)$$

$T_0$  – характеристическая температура

$$T_0 = \frac{T_a - T_b}{\ln(I_{TH}(T_a)) - \ln(I_{TH}(T_b))}$$

Температурная  
зависимость  
дифференциальной  
эффективности

$$n_d(T) = n_d(T_{ref}) \exp\left(-\frac{T - T_{ref}}{T_1}\right)$$

$T_1$  – характеристическая температура диф. эффективности

Температура на лазерной линейке

$$T(I, T) = T_{HS} + R_{th} \cdot (U(I) \cdot I - P_{opt}(I, T))$$

Тепловое

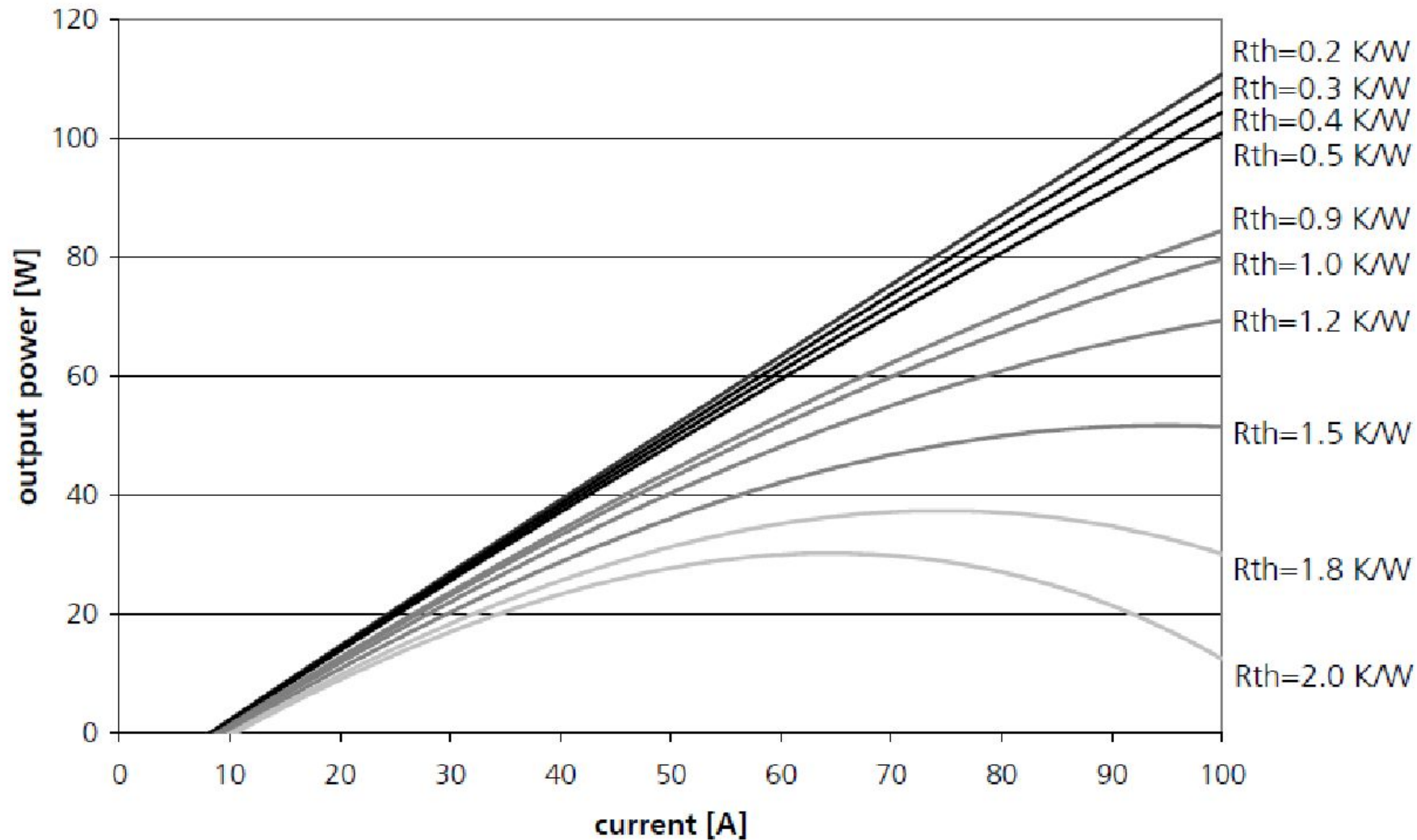
$$R_{th} = \frac{dT_{laser}}{dP_{loss}}$$

$$P_{loss}(I) = U(I) \cdot I - P_{opt}(I)$$

$$T_{laser}(I) = T_{without} + \left[\frac{d\lambda}{dT}\right]^{-1} (\lambda(I) - \lambda_{without})$$

$$R_{th} = \frac{d\lambda_{laser}}{dP_{loss}} \cdot \left[\frac{d\lambda}{dT}\right]^{-1}$$

# Пример Ватт-Амперной Характеристики линейки лазерных диодов



$T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$

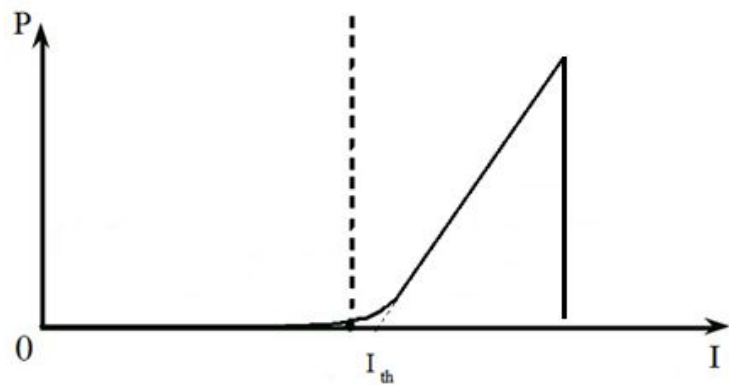
$T_0=150\text{K}$

$T_1=350\text{K}$

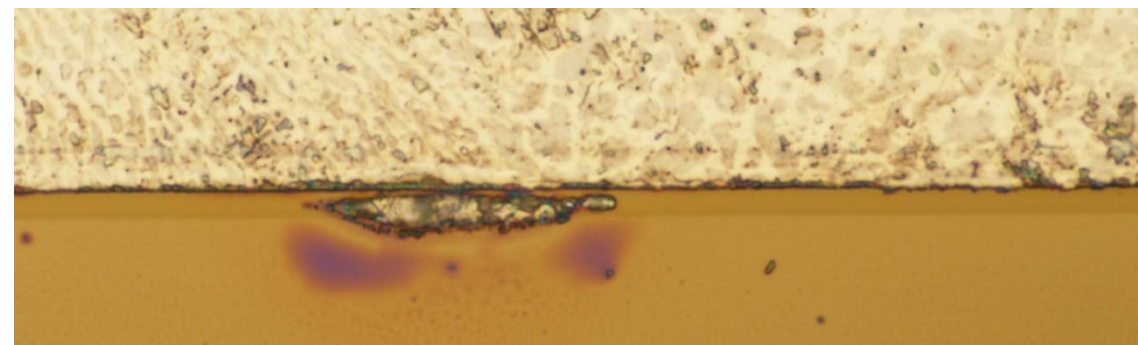
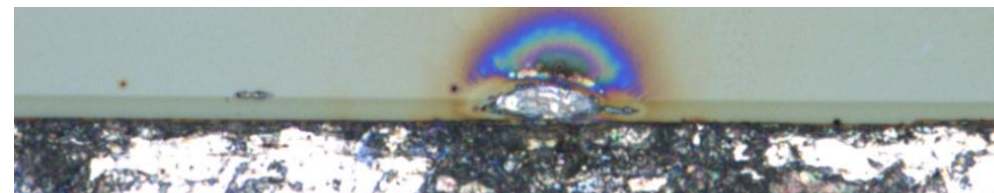
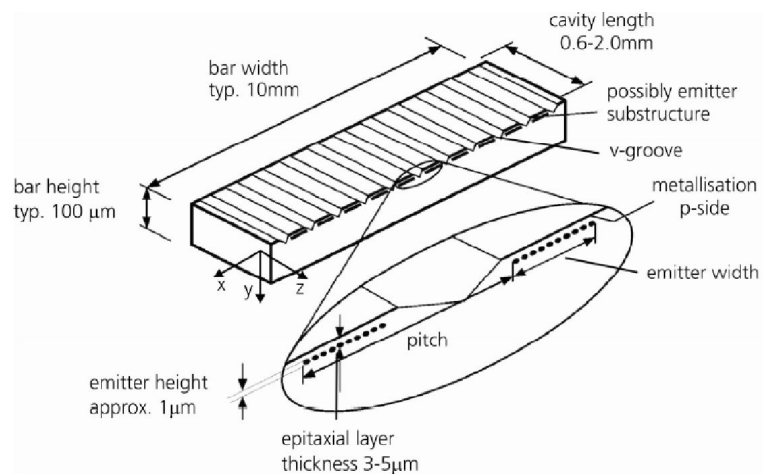
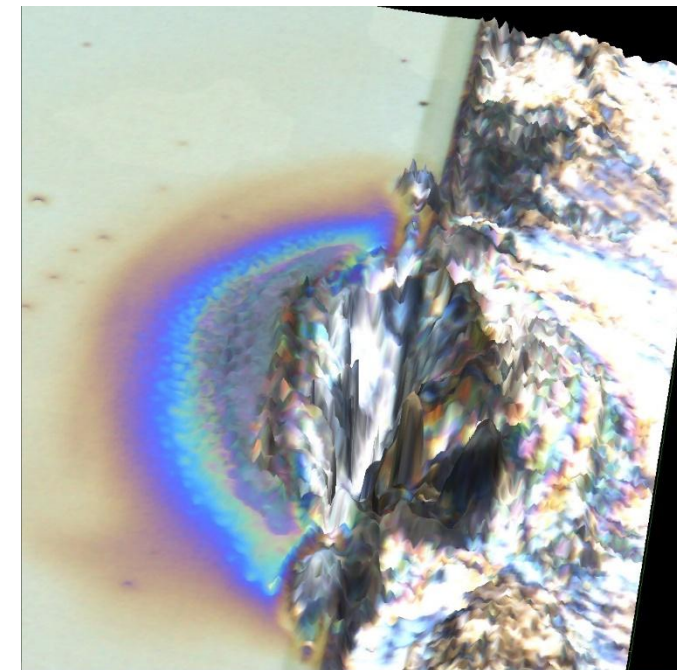
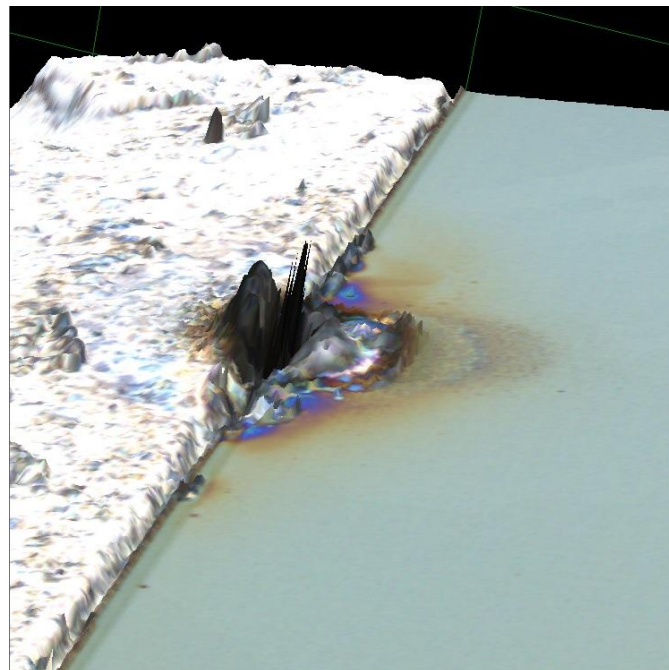
$\eta_d(T)=1.1\text{ W/A}$

$I_{th}(T)=8\text{A}$

# Катастрофическая Оптическая Деградация



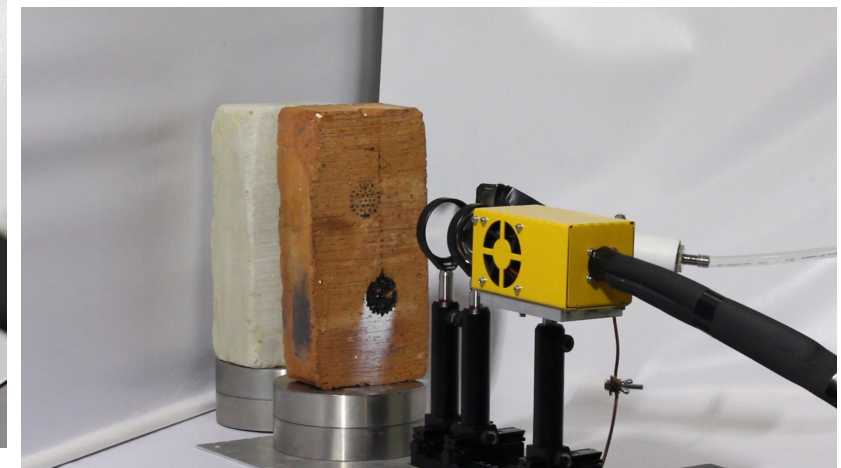
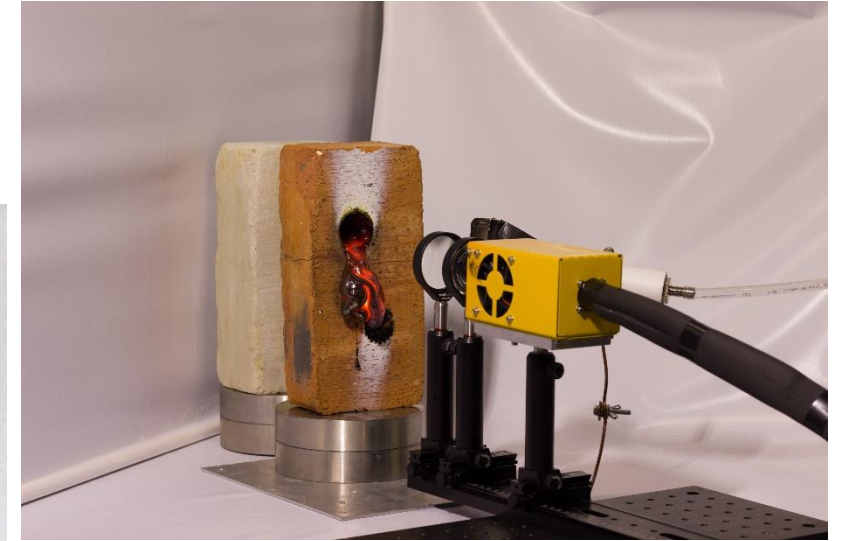
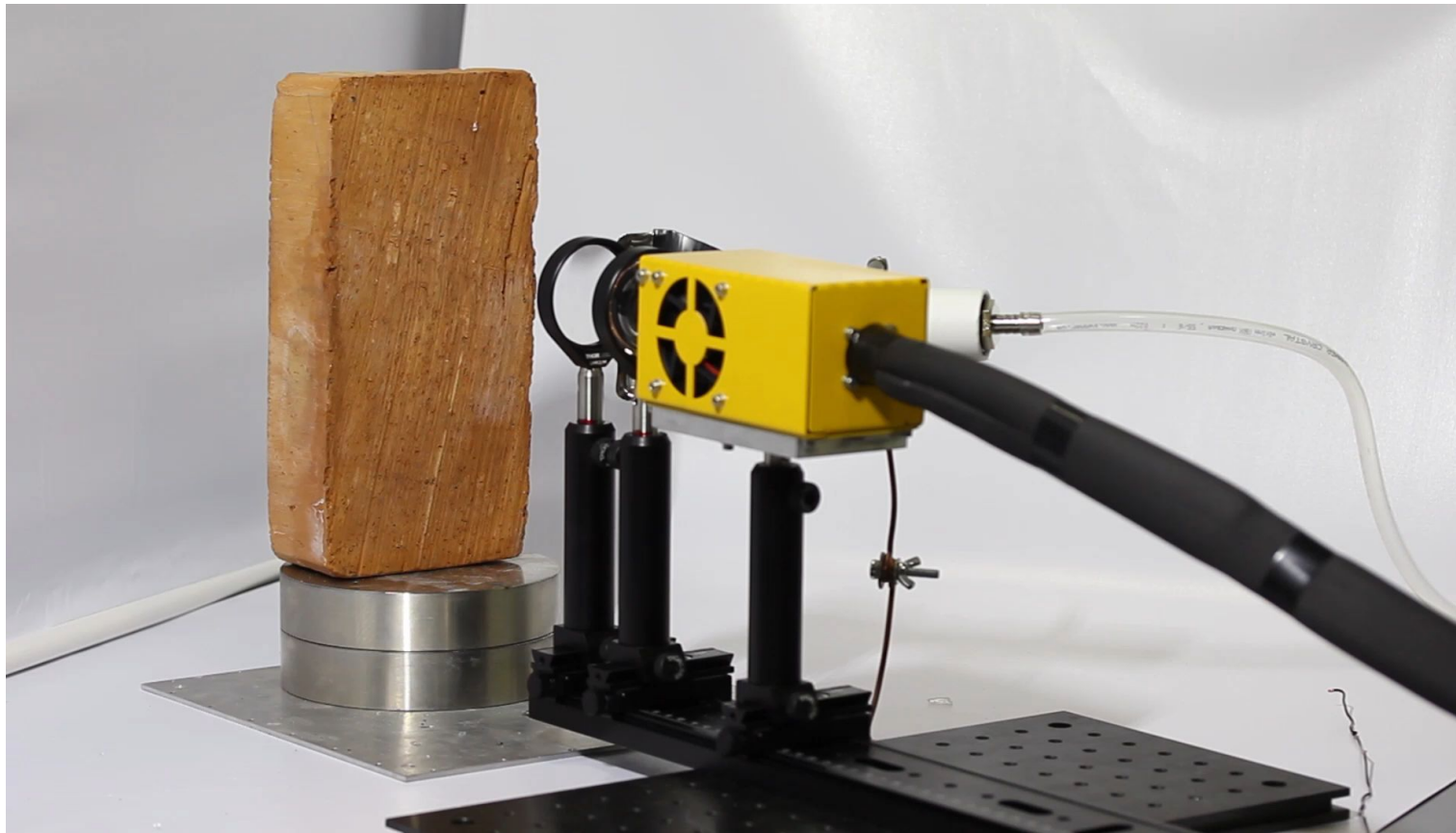
Плотность мощности у  
линейки 60 Вт  
составляет 1.2 МВт/см<sup>2</sup>



# Воздействие мощного лазерного излучения на материалы

Мощность 4 кВт

Диаметр 25 мм



Спасибо за внимание!