

# **Новый учебный курс: «Лазерная спектроскопия элементарных возбуждений в твёрдом теле»**

**к.ф.-м.н. с.н.с. Кузнецов Кирилл Андреевич**

**Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова  
[kirill-spdc@yandex.ru](mailto:kirill-spdc@yandex.ru)**

**Проект реализуется победителем грантового конкурса  
для преподавателей магистратуры 2021/2022  
Стипендиальной программы Владимира Потанина**

# Программа курса:

## I. Основы физики лазеров

1.1 Оптический квантовый генератор, условия самовозбуждения.

1.2 Спонтанные и вынужденные переходы. Механизмы уширения линии генерации.

1.3 Добротность и модовый состав резонаторов. Устойчивость резонатора (диаграмма Фокса-Ли).

1.4 Фильтрация продольных и поперечных мод лазера.

1.5 Непрерывный режим. Свободная генерация. Модуляция добротности. Синхронизация мод.

## II. Лазеры (основные типы, примеры)

2.1 Непрерывные лазеры. Аргонный лазер. CO<sub>2</sub>-лазер. Полупроводниковые лазеры. Квантовый каскадный лазер

2.2 Импульсные лазеры. Лазер на алюмо-иттриевом гранате с модуляцией добротности. Лазеры на центрах окраски.

2.3 Лазеры ультракоротких импульсов (УКИ). Насыщающиеся поглотители. Фазовая самомодуляция. Фемтосекундный режим генерации титан-сапфирового лазера. Фемтосекундные волоконные лазеры.

2.4 Методы усиления УКИ: многопроходный усилитель, регенеративный параметрический усилитель, метод усиления «чирпированных» импульсов.

2.5 Генерация импульсного терагерцового излучения (фотопроводящая полупроводниковая антенна, оптическое выпрямление, оптический “пробой”, квантовый каскадный лазер).

2.6 Принципы измерения временных характеристик УКИ (корреляционные методы).

### **III. Спектроскопия бозонных возбуждений.**

3.1 Фононы. Комбинационное (Рамановское) рассеяние. Бриллюэновское рассеяние.

3.2 Рассеяние света на когерентных фононах (ISRS и DECP).

3.3 Фононные поляритоны. Рассеяние света на флуктуационных поляритонах.

3.4 Экситоны, экситонные поляритоны. Рамановское и бриллюэновское рассеяние в резонансе с экситонами.

3.5 Активная спектроскопия поляритонов. Метод когерентного антистоксового рассеяния (КАРС). Спектроскопия временного разрешения терагерцовых поляритонов.

3.6 Магноны. Сверхбыстрый оптомагнетизм.

## V. Поверхностные возбуждения в твердом теле.

5.1 Поверхностные возбуждения: фононные поляритоны, экситонные поляритоны, плазмоны, плазмон-поляритоны. Линейнооптическое возбуждение: схемы Отто и Кречмана, дифракция на решетке. Микроскоп на поверхностных плазмонах.

5.2 Нелинейнооптическая активная спектроскопия поверхностных возбуждений.

5.3 Топологические изоляторы. Фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением (ARPES).



# ПОТЕНЦИАЛ ДЛЯ СОТРУДНИЧЕСТВА

Проект актуален в связи с переходом на новые образовательные стандарты, внедрением квантовых технологий в сфере бизнеса и коммуникаций, а также развитием "зеленой энергетики". Новизна учебного продукта состоит в операциональном подходе к наблюдаемым явлениям, в стремлении выразить физические понятия через наблюдаемые и измеряемые в эксперименте величины. Такой курс на стыке разных научных дисциплин - физики твердого тела, лазерной физики, квантовой оптики - актуален и востребован образовательным сообществом. Исследования новых явлений, физических объектов, технологий таких, как: сверхбыстрый оптомагнетизм, топологические изоляторы, полупроводниковые наногетероструктуры, терагерцовые технологии и т.д., должны найти отражение в учебных курсах, читаемых в ВУЗах, что открывает возможности для сотрудничества.

Создаваемый новый учебный курс удачно встраивается в концепцию развития МГУ и Технологической долины МГУ, опирается на фактические достижения мирового масштаба научных Школ Д.Н. Клышко и акад. Л.В. Келдыша. Принципиально возможно его прочтение в других ВУЗах и институтах (ИТМО, ВШЭ, Сколтех).





# Лазеры в спектроскопии ТТ

Непрерывные

Импульсные

1. Длительность:

$t_{\text{pulse}} = 1-10 \text{ нс}$

$t_{\text{pulse}} = 1-10 \text{ пс}$

$t_{\text{pulse}} = 10-100 \text{ фс}$

2. Частота:

УФ: 200-400 нм

Вид: 400-800 нм

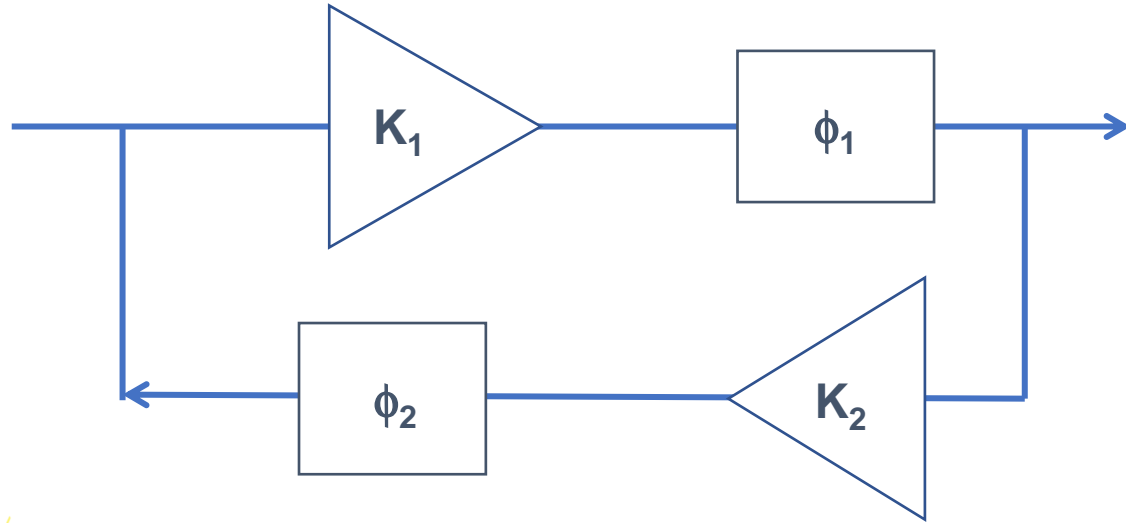
ИК: 1-100 мкм

ТГц:  $10^2-10^3$  мкм

3. Мощность:

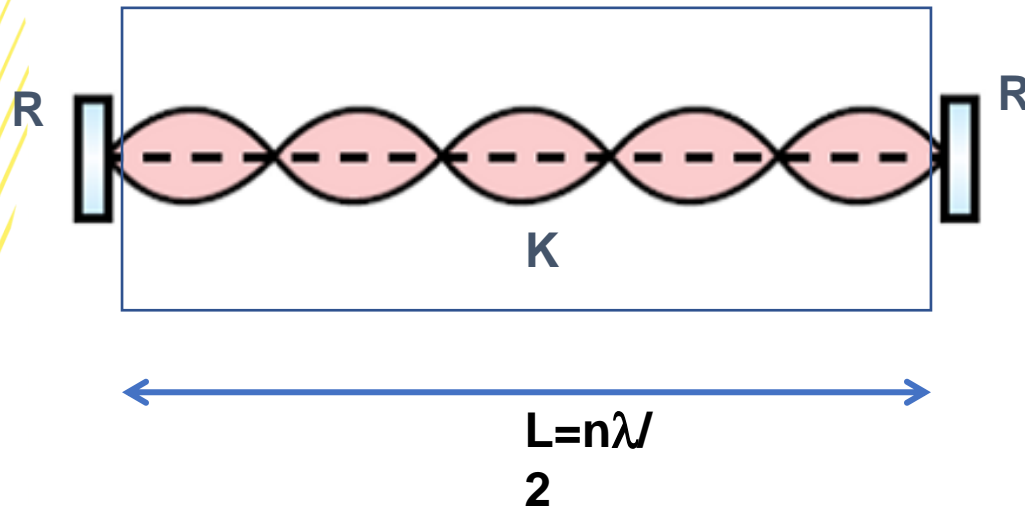
$P = 10^{-6} \text{ Вт} - 10^{12} \text{ Вт}$

# Принцип действия генератора



$$K_1 K_2 = 1$$

$$\phi_1 + \phi_2 = 2\pi n$$

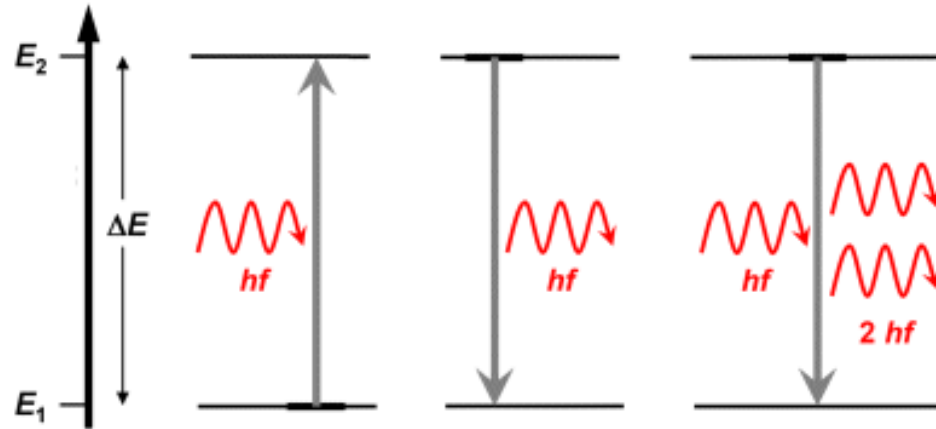


$$RK = 1$$

$$\omega = \frac{\omega_{рез} \Delta\omega_{ушир} / \ln(K) + \omega_0 \Delta\omega_{рез}}{\Delta\omega_{ушир} / \ln(K) + \Delta\omega_{рез}}$$



# Переходы в двухуровневой системе



$$\frac{A}{B_{ij}} = \frac{2\hbar}{\pi} \left( \frac{\omega}{c} \right)^3$$

$$W_{ij}^{\text{вынужд}} = B_{ij} \rho_{\omega}$$

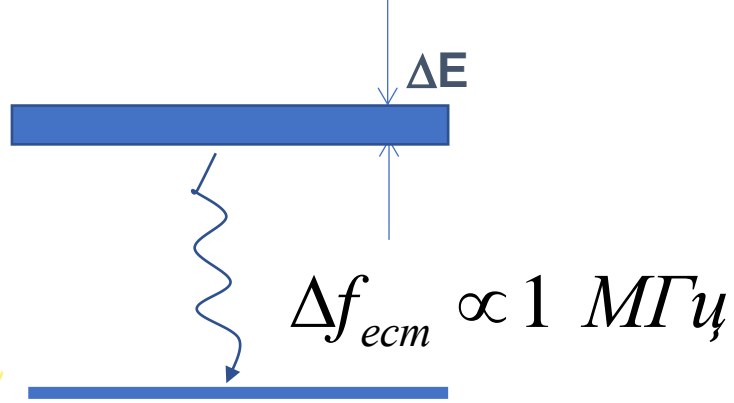
$$W_{ij}^{\text{спонт}} = A$$

$$B_{ij} = \frac{8\pi}{3} \frac{\left( \int \psi_2^* \hat{d} \psi_1 dV \right)^2}{\hbar^2}$$

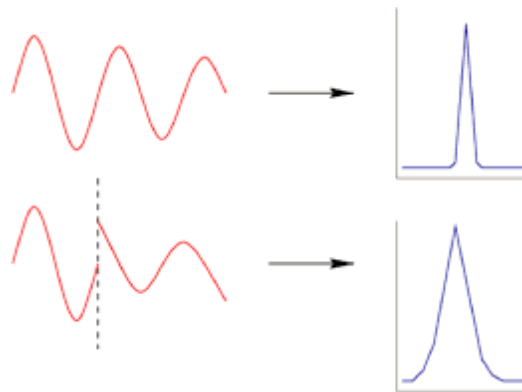
$$A = \frac{16}{3} \left( \frac{\omega}{c} \right)^3 \frac{\left( \int \psi_2^* \hat{d} \psi_1 dV \right)^2}{\hbar}$$

# Уширение линий в газах

Однородное  
- естественное

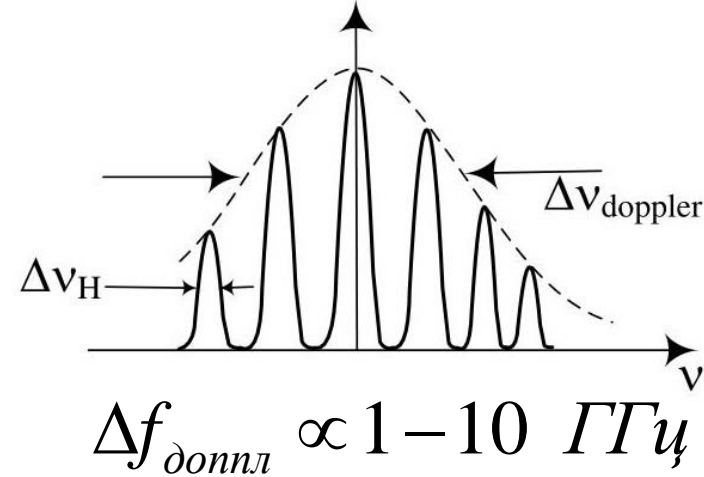


- столкновительное

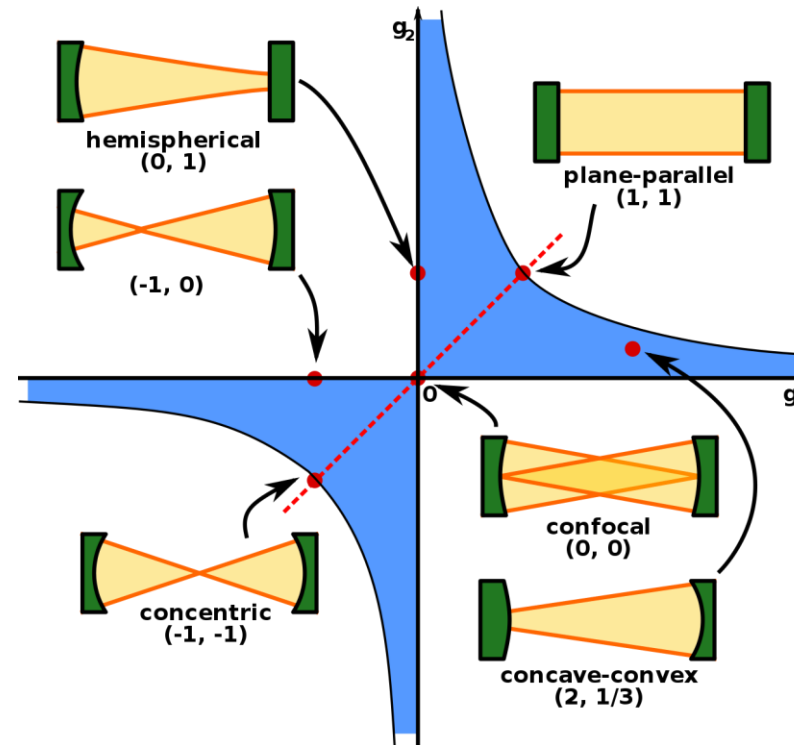
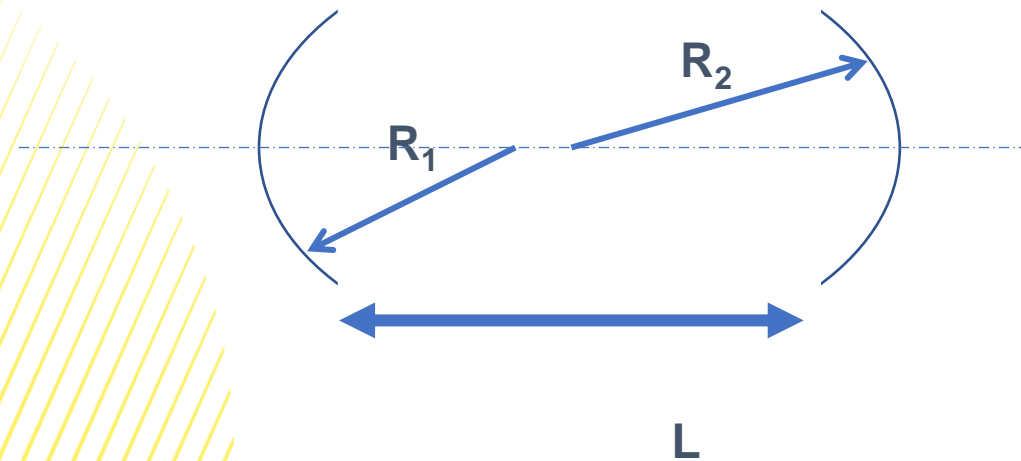


$$\Delta f_{столк} \propto 10 - 100 \text{ МГц}$$

Неоднородное  
- доплеровское



# Резонаторы



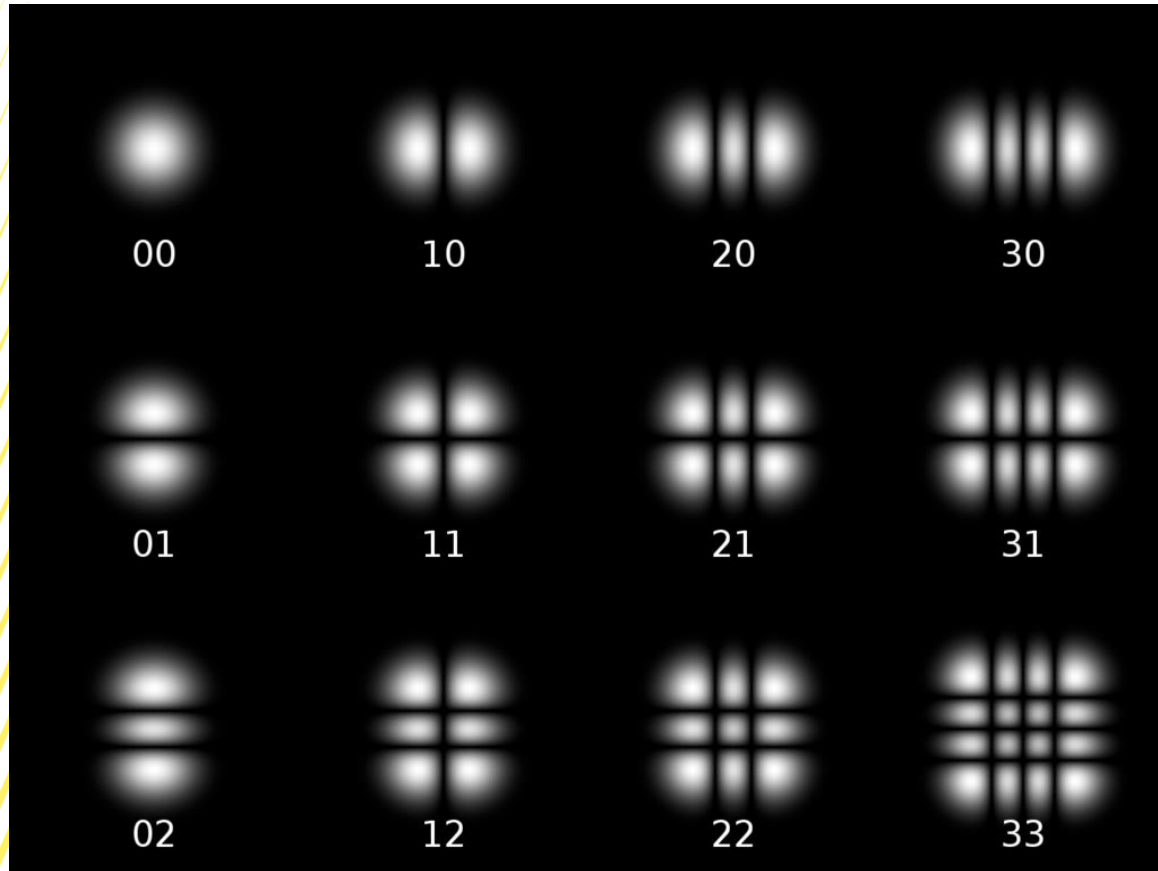
$$g_1 = 1 - L/R_1,$$

$$g_2 = 1 - L/R_2$$

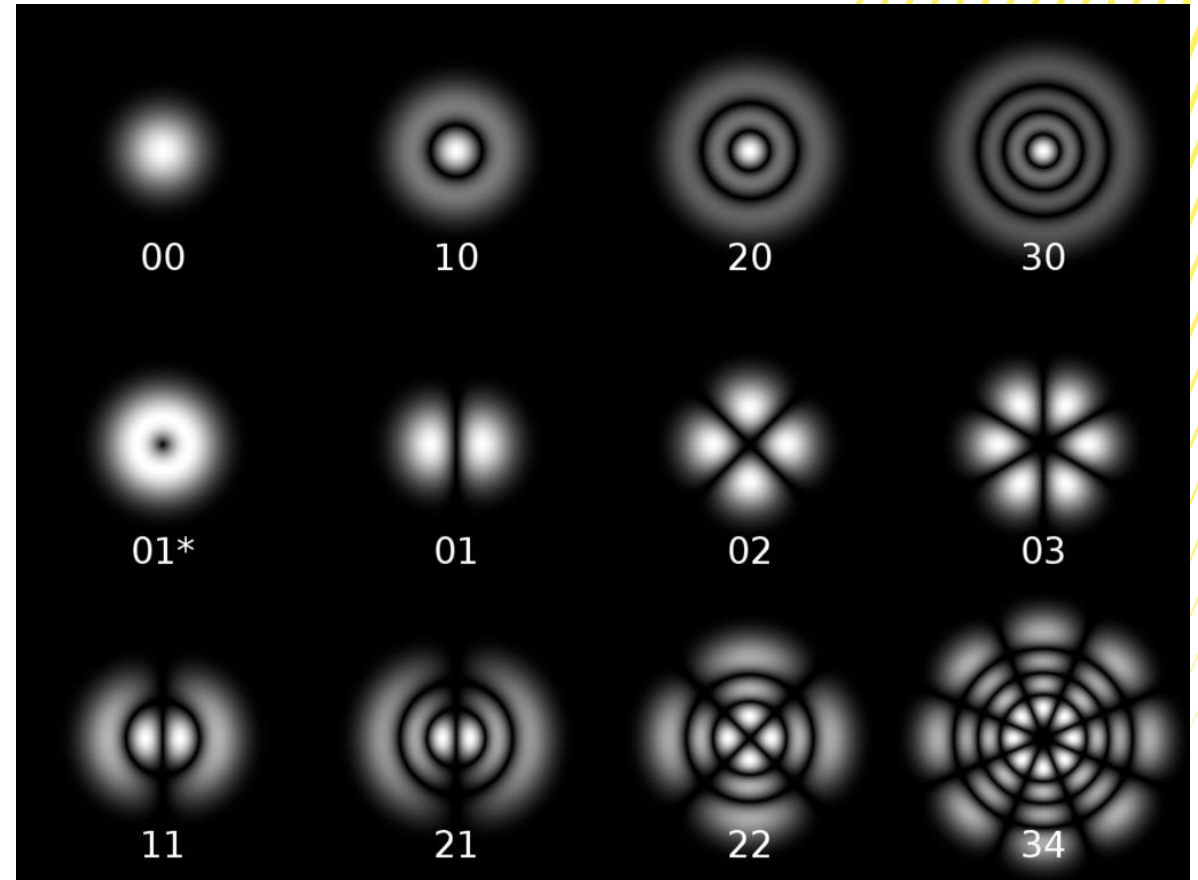
$$0 < g_1 \cdot g_2 < 1$$

# Моды резонатора

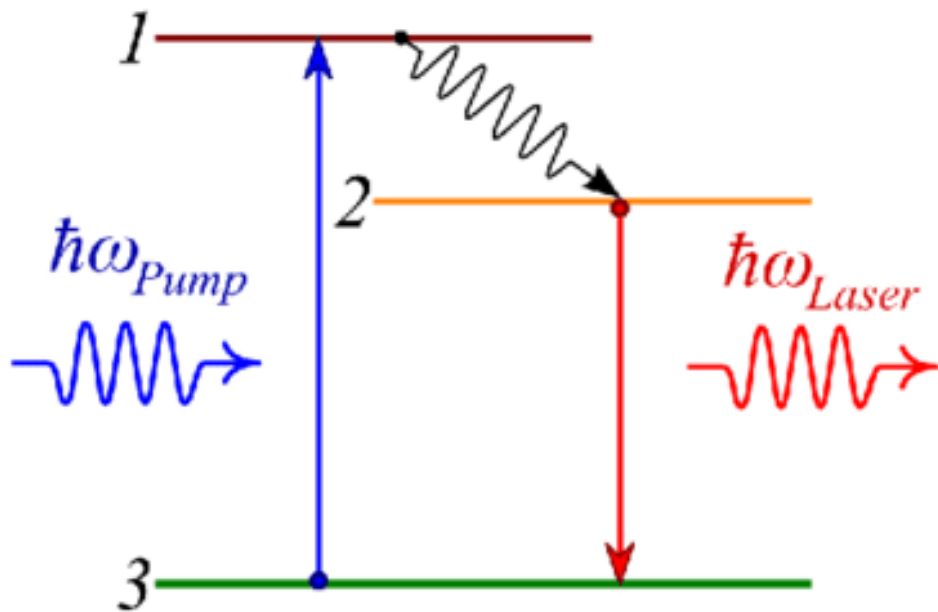
## Прямоугольные зеркала



## Сферические зеркала



## Свободная генерация. Непрерывный режим.



$$N_3 + N_2 = N_{total}$$

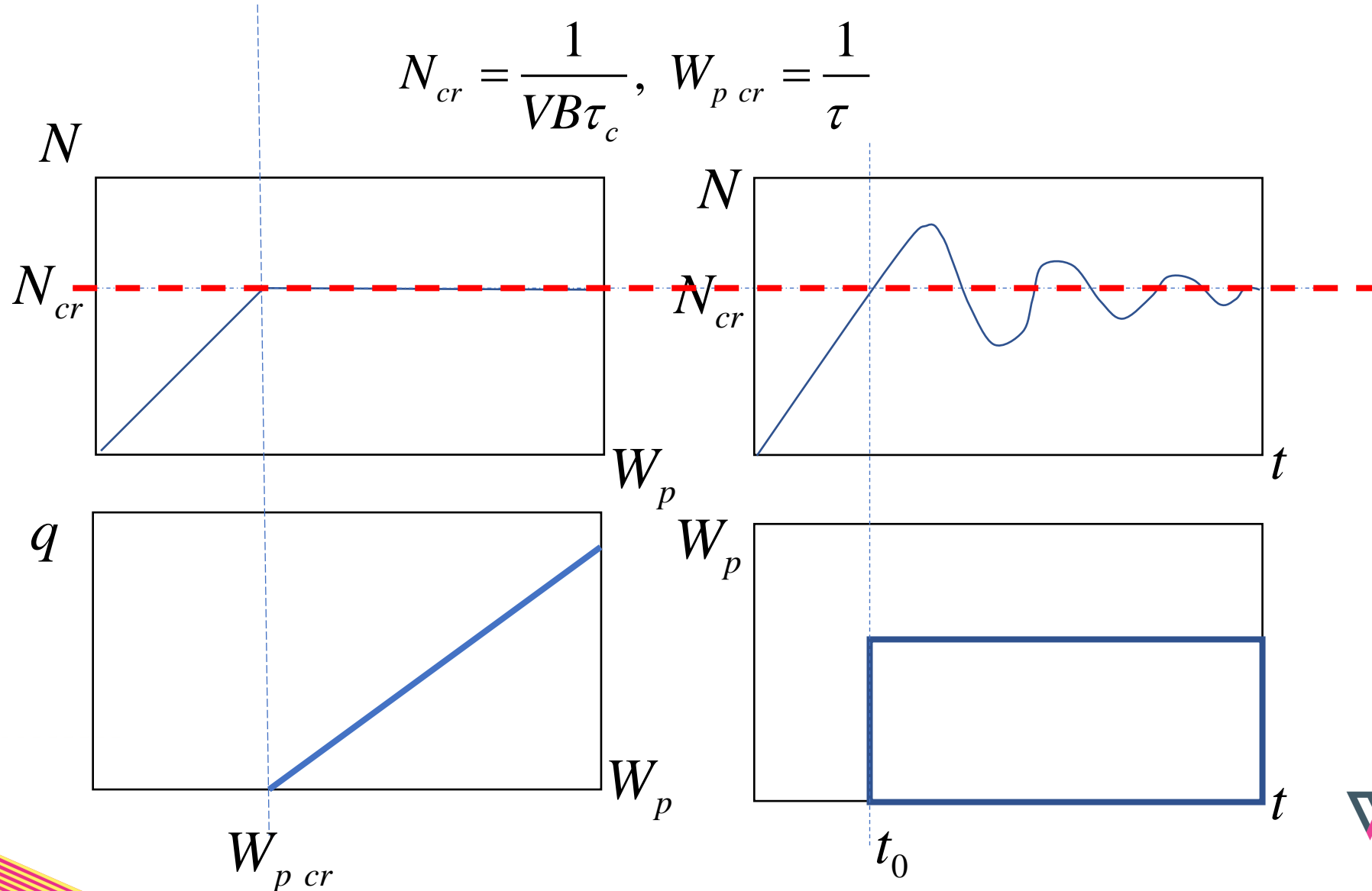
$$\frac{dN_2}{dt} = W_{pump} N_1 - Bq(N_2 - N_3) - N_2 / \tau$$

$$\frac{dq}{dt} = (VB(N_2 - N_3) - 1/\tau_c)q$$

# Временная динамика инверсии населенностей

$$N_2 - N_3 \equiv N, \quad \frac{dq}{dt} = \frac{dN}{dt} = 0$$

$$N_{cr} = \frac{1}{VB\tau_c}, \quad W_{p\ cr} = \frac{1}{\tau}$$

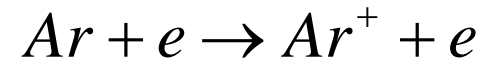




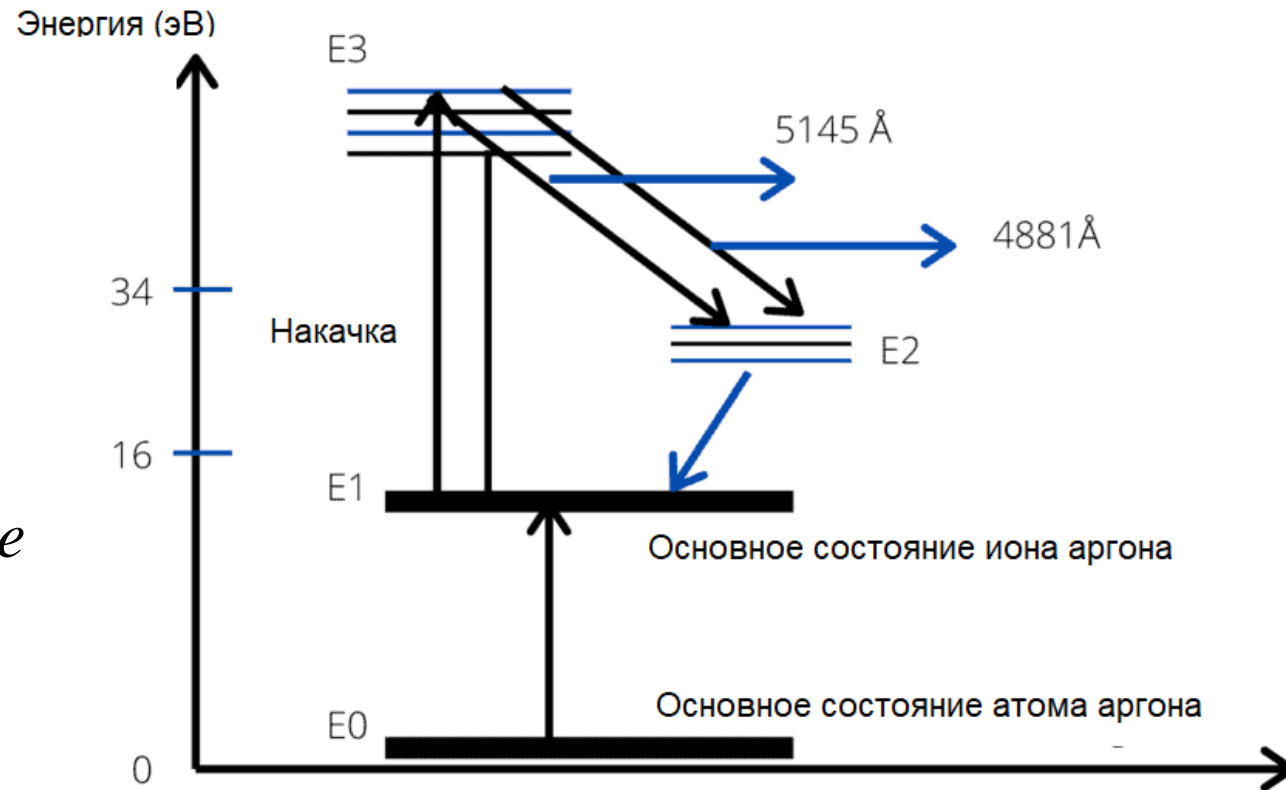
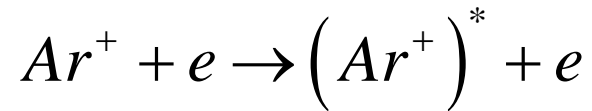
# Газовые непрерывные лазеры видимого и УФ диапазонов

- аргонный лазер (351, 488, 514.5 нм)

1 этап:



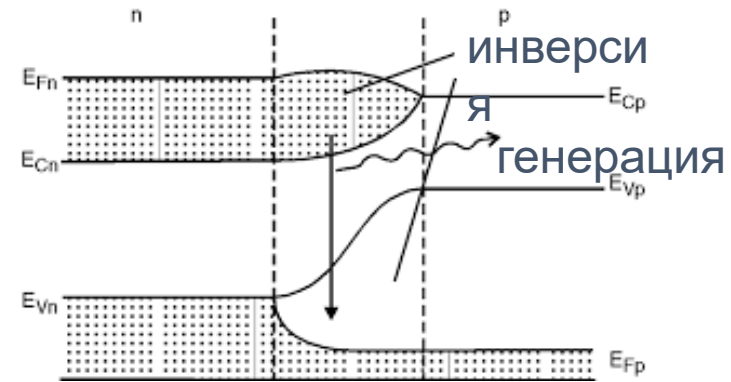
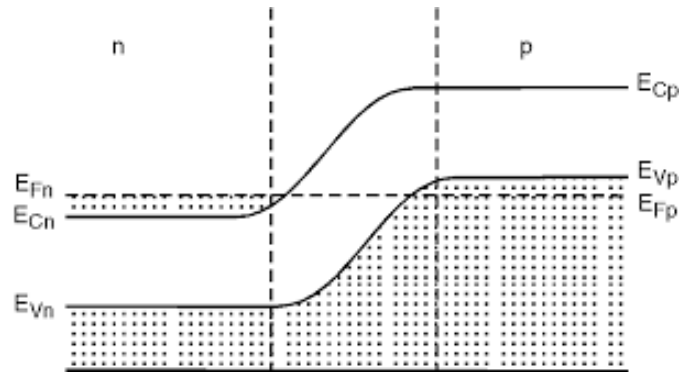
2 этап:



- гелий-кадмиевый лазер (325, 442 нм)
- гелий-неоновый лазер (632.8, 1150 нм)

- .....

# Полупроводниковые непрерывные лазеры видимого и ближнего УФ диапазонов

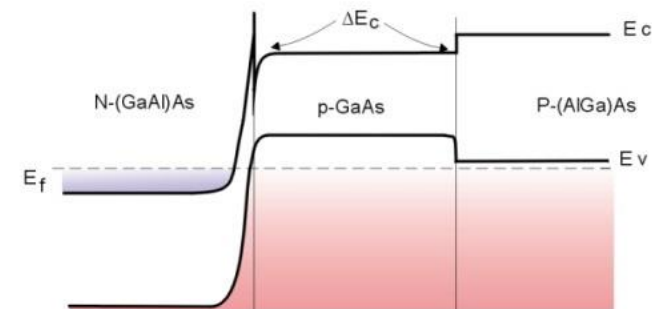


Вырожденный полупроводник

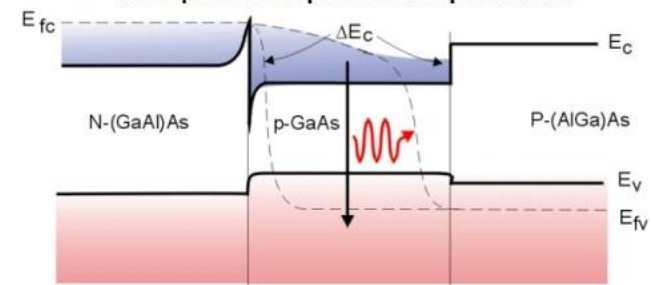
Смещение p-n перехода => электролюминесценция

Использование гетероструктур позволяет  
уменьшить пороговый ток на порядки!!!

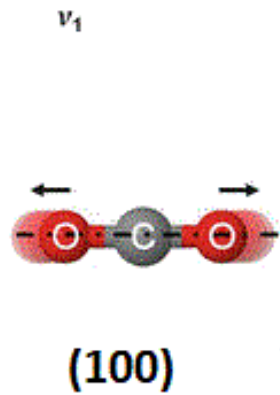
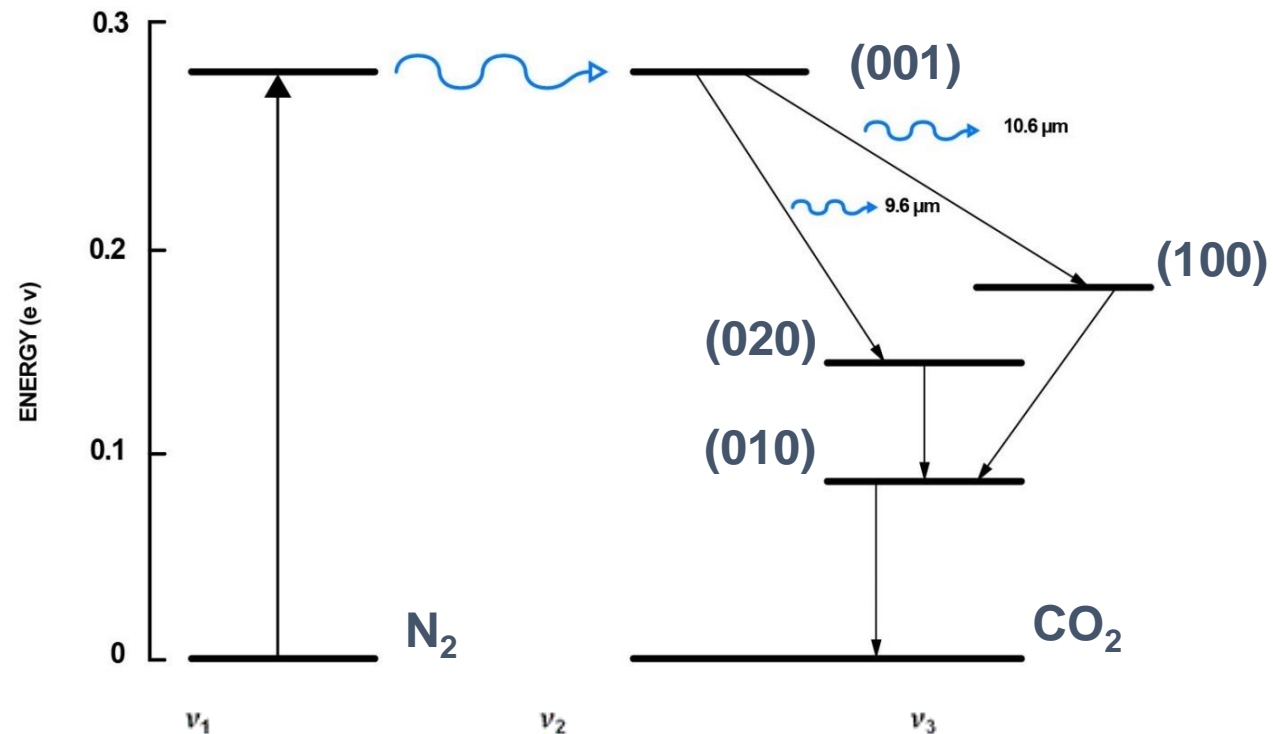
(a) равновесная зонная диаграмма



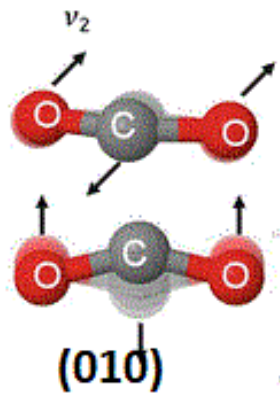
(b) смещенная в прямом направлении



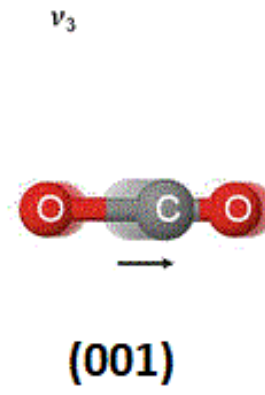
# ИК лазер на CO<sub>2</sub> газе



Симметричная  
валентная мода  
(40 ТГц)

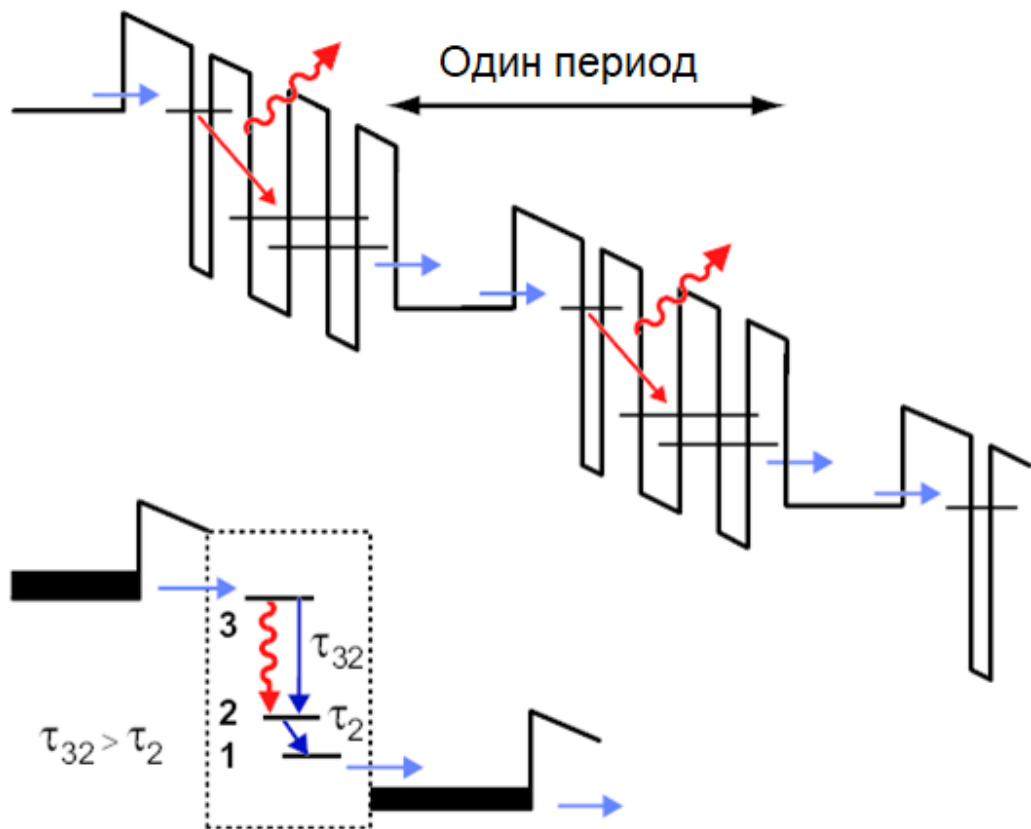


Деформационная  
мода (20 ТГц)

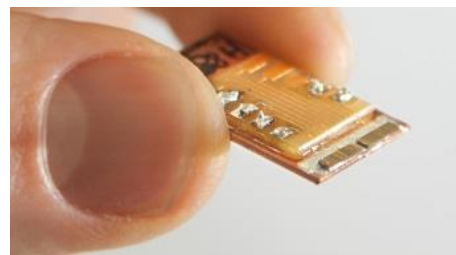
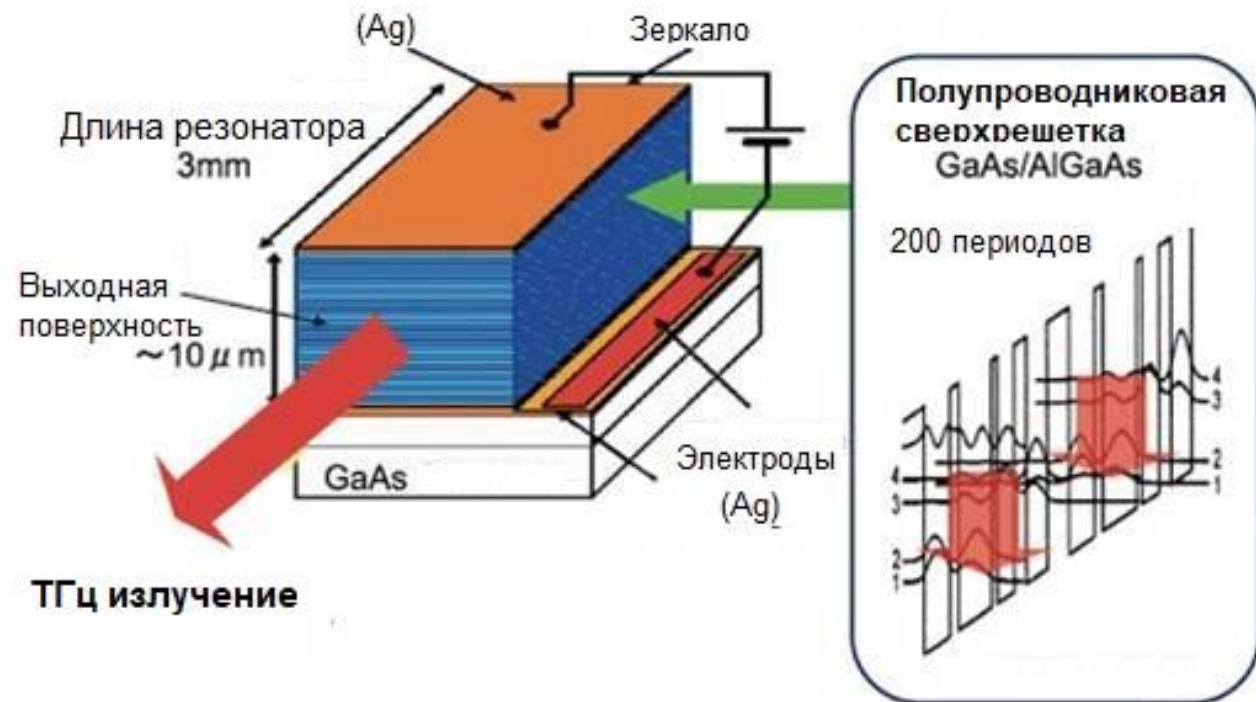


Асимметричная  
валентная мода  
(70 ТГц)

# ТГц квантово-каскадные лазеры



Активная область/релаксация и инжекция



**Спасибо за внимание!**