

# Ознакомление с физическими и технологическими принципами работы мощных импульсных полупроводниковых лазеров с интегрированным тиристорным переключателем

Демонстрационный материал разработан при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013, соглашение 8694

# План

Актуальность

Постановка задачи

Анализ электрооптических характеристик  
лазера-тиристора на основе разработанной модели

Результаты экспериментальных исследований  
излучательных характеристик лазера-тиристора

Заключение

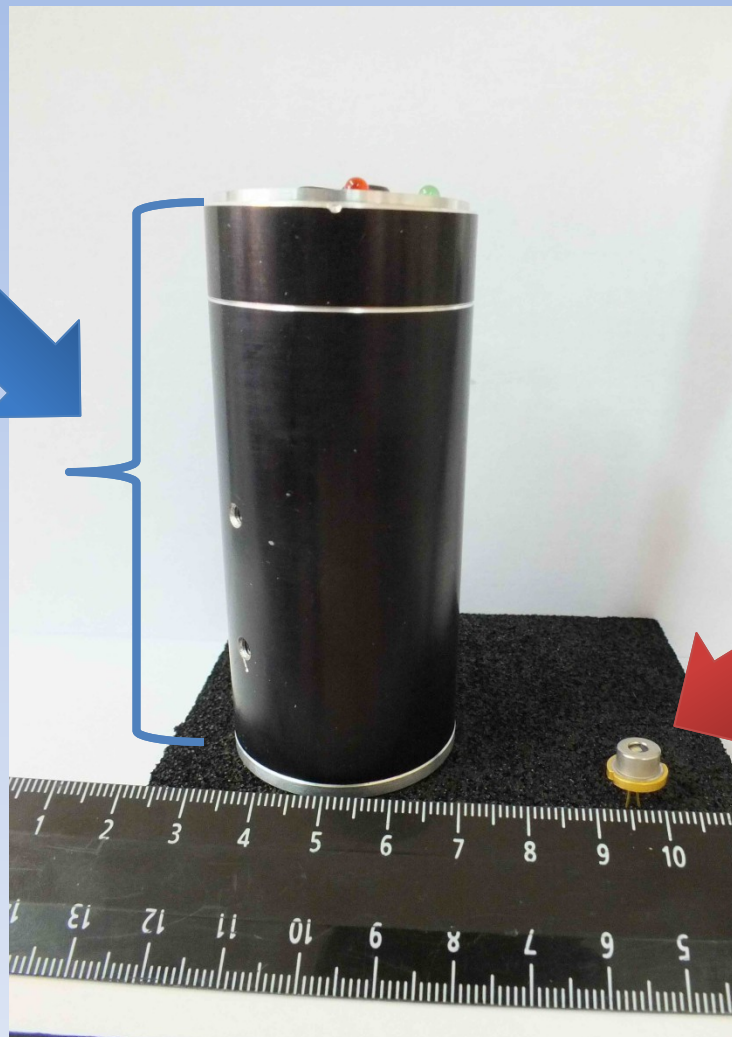
# Актуальность

Существующий  
подход

Пиковая мощность 100 Вт  
Пиковый ток 150 А  
Длительность импульса 100 нс  
Частота 1-10 кГц

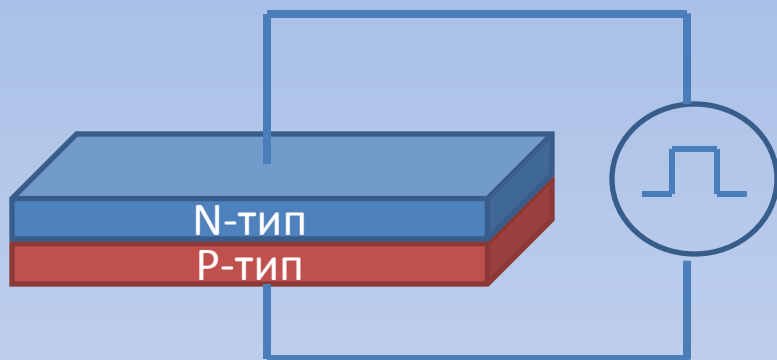
## Недостатки

- ❖ Большие габариты
- ❖ Высокая стоимость
- ❖ Сложность изготовления
- ❖ Индуктивные связи



Предлагаемый  
подход

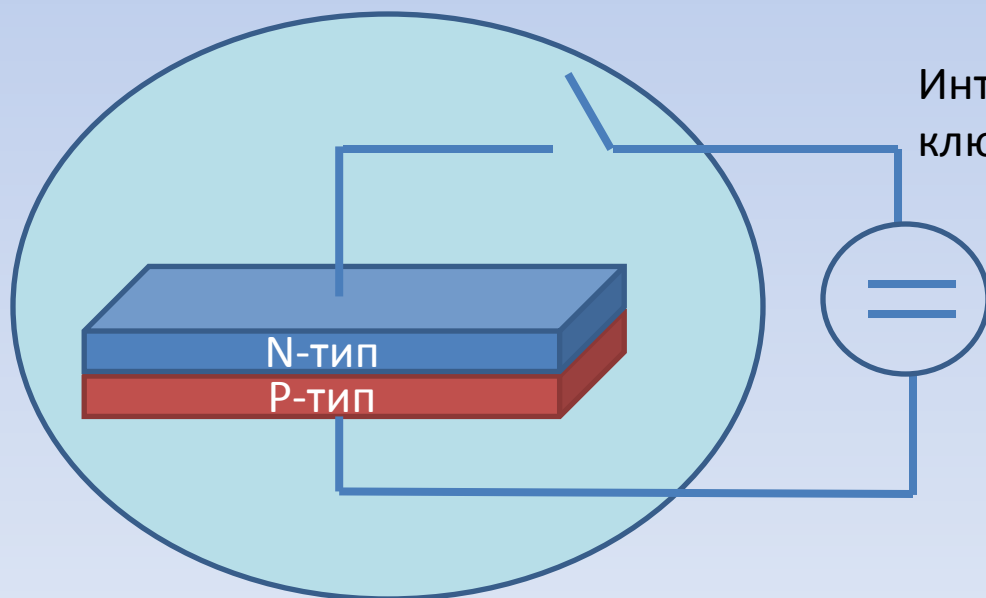
# Цель работы



Длительности импульса 1 - 200 нс

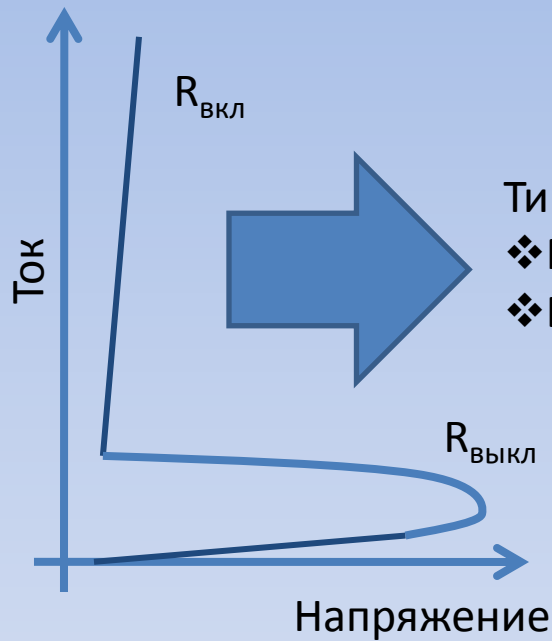
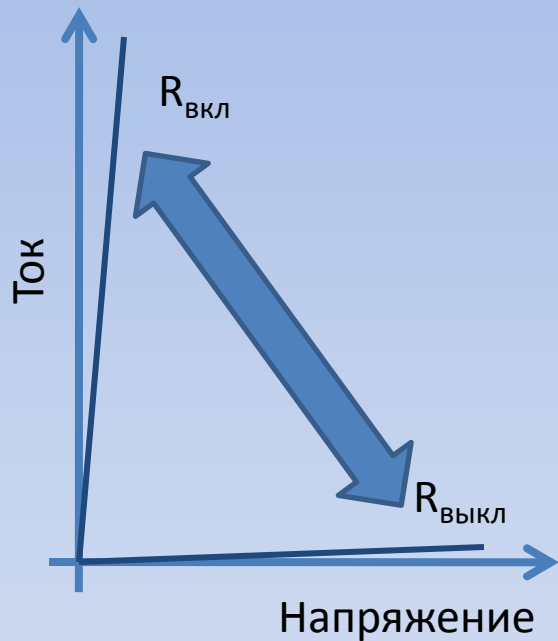
Амплитуда более 50 А

Частота 1 – 1000 кГц



Интеграция мощного быстродействующего ключа в лазерную гетероструктуру

# Требования к ключу



Тиристорные структуры

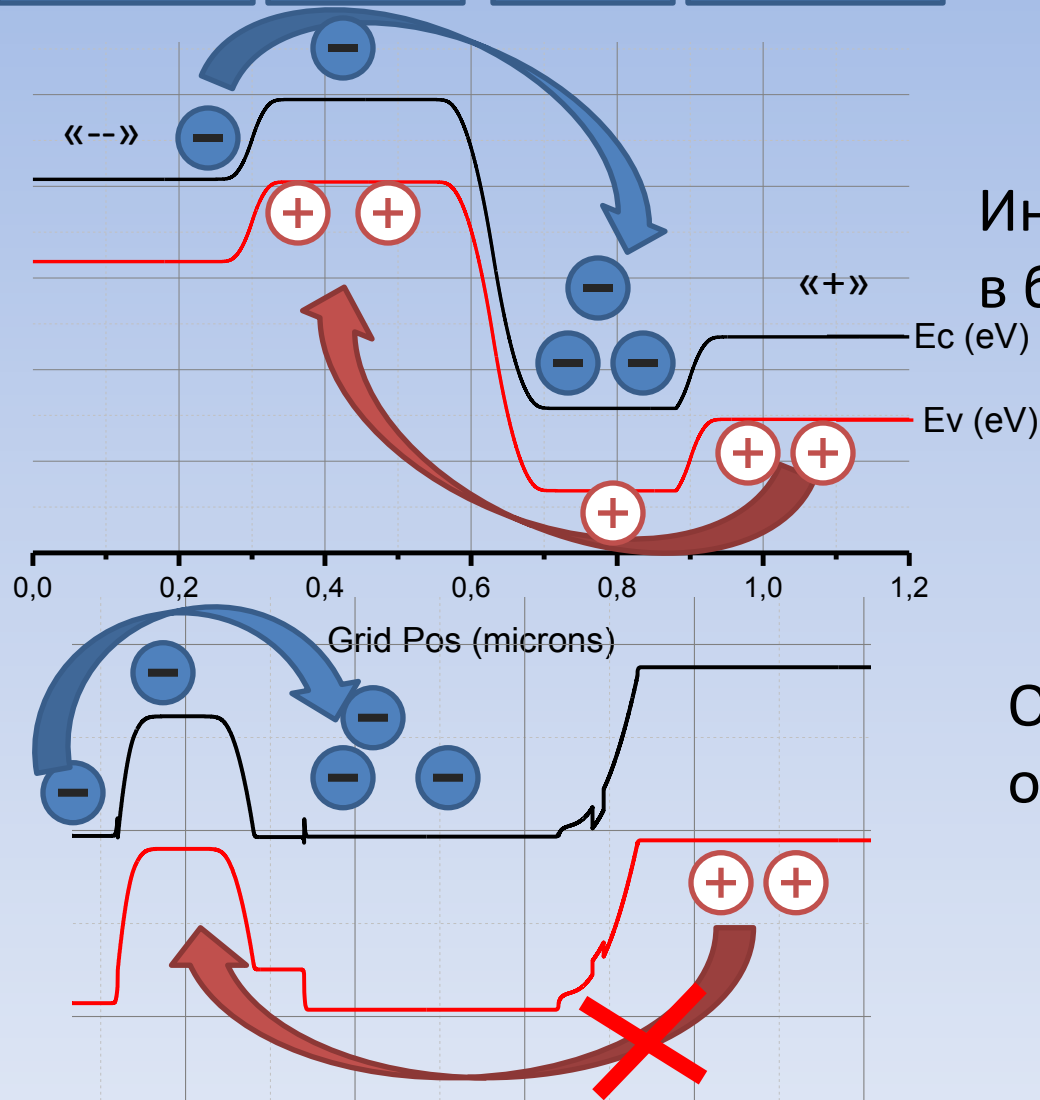
- ❖ Малосигнальное управление
- ❖ Высокие мощности переключения

## Требование

Переключение из закрытого в открытое состояние малыми управляющими сигналами

# Гиристорная структура

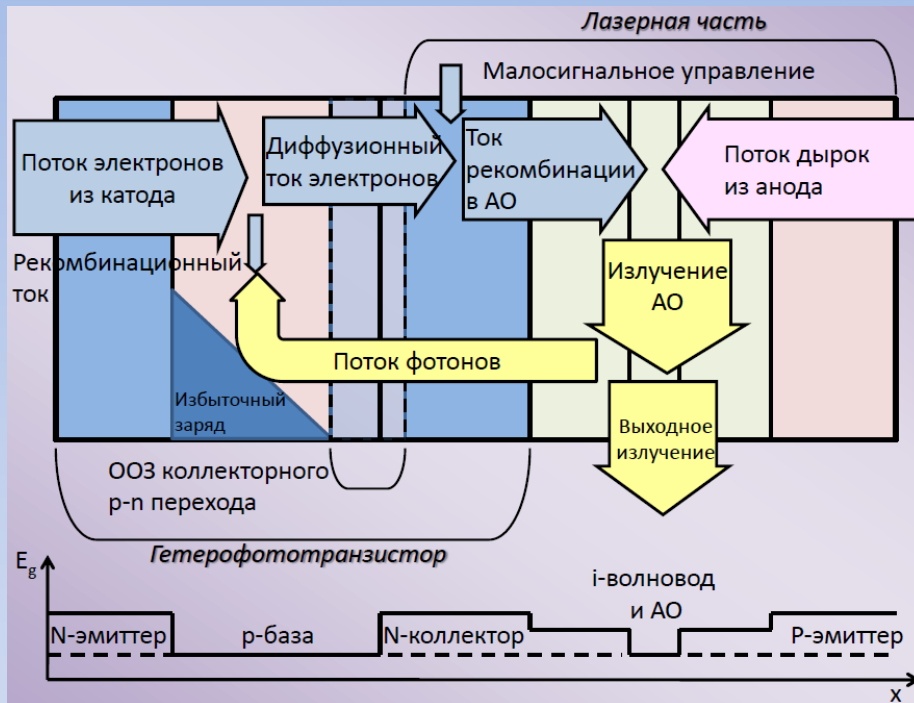
N-эмиттер    P-база    N-база    P-эмиттер



Инжекция основных носителей  
в базовые области

Одностороннее  
ограничение инжекции

# Модель лазера-тиристора



## Основные положения модели

- ❖ Основа модели: взаимосвязанные электрические и оптические процессы в трехэлектродной интегральной гетероструктуре «лазерный диод-гетерофототранзистор»
- ❖ Полностью оптическая «передача» дырок через коллекторный p-n переход
- ❖ Насыщение потока спонтанных фотонов за порогом генерации в АО

## Приближения, используемые в аналитическом варианте

- ❖ Низкий уровень инжекции
- ❖ Диффузионный ток электронов в p-базе
- ❖ Тонкие базовые области: рекомбинацией можно пренебречь

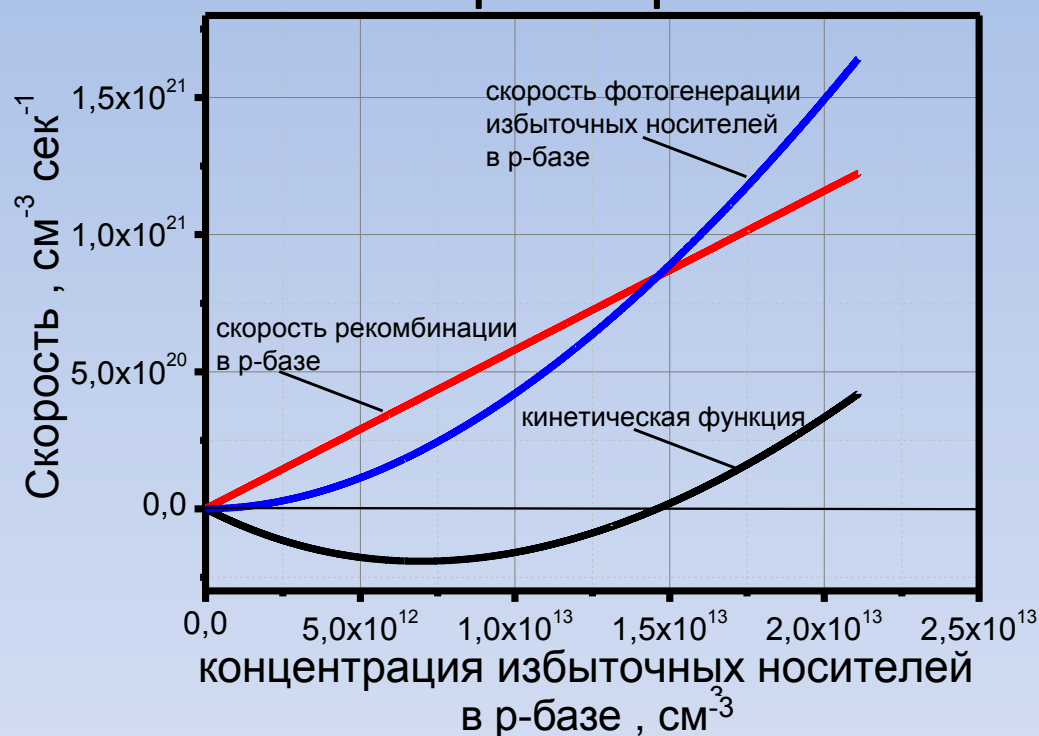
Статическая ВАХ

$$I_A = I_G + F(I_A) \cdot (1 - \exp(-\alpha \cdot W_B)) \cdot q \cdot D_e \cdot \frac{2 \cdot \tau_{eff}}{(W_B - \Delta_p)^2}$$

Динамическая ВАХ

$$\begin{cases} \frac{dQ_{e-h}}{dt} = G_{e-h} - R_{e-h} - C_c \cdot \frac{dU_c}{dt} \\ \frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C_{cap}} \cdot \left( q \cdot D_e \cdot \frac{2 \cdot Q_{e-h}}{(W_B - \Delta_p)^2} \right) \end{cases}$$

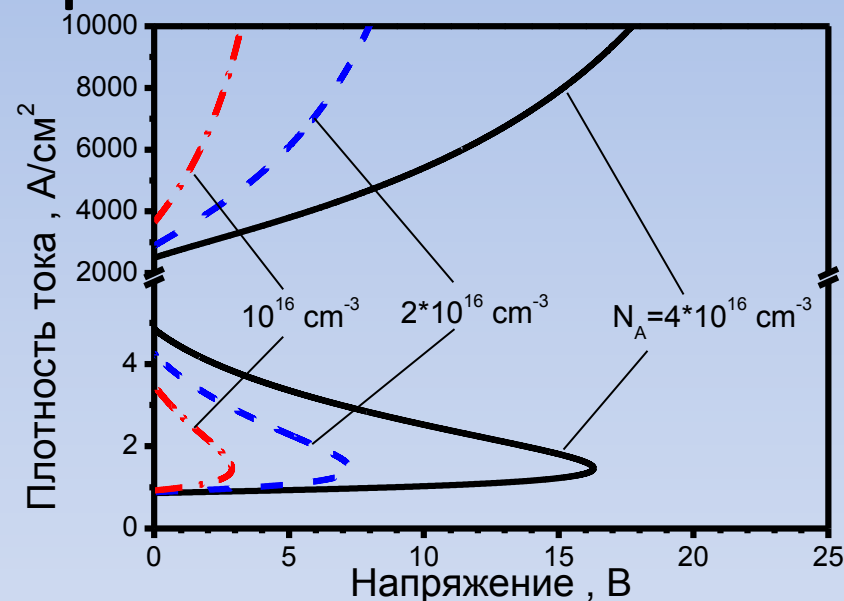
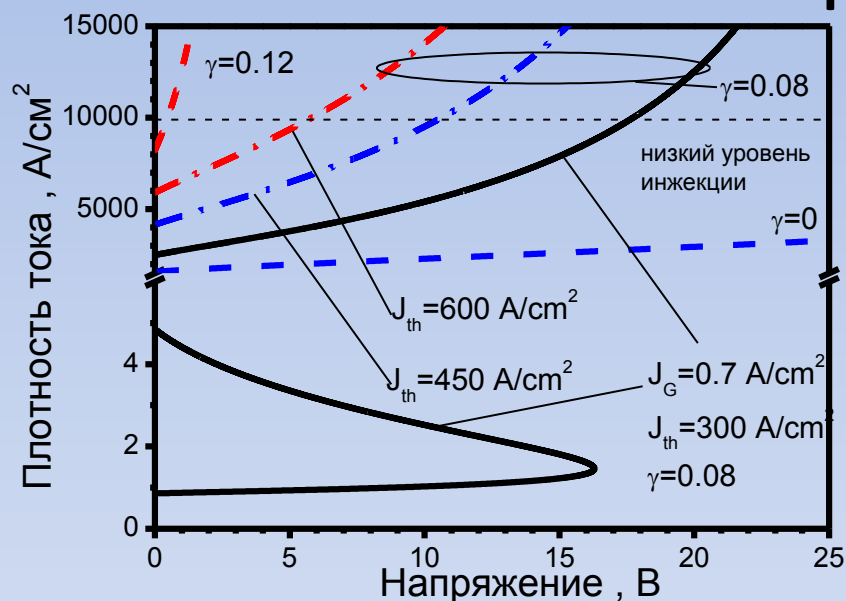
# Условие формирования блокирующей ветви ВАХ лазера-тиристора



❖ Наличие области концентраций, в которой скорость рекомбинации в р-базе меньше скорости фотогенерации в АО



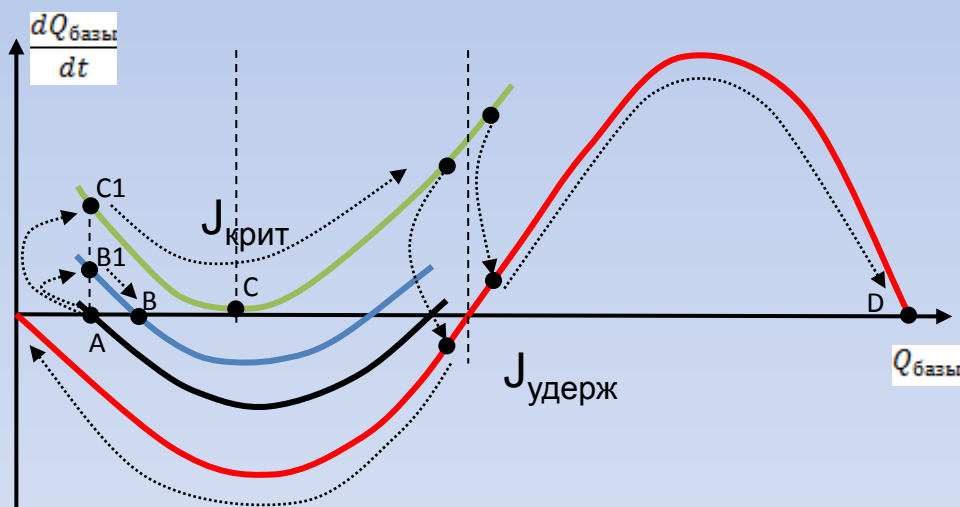
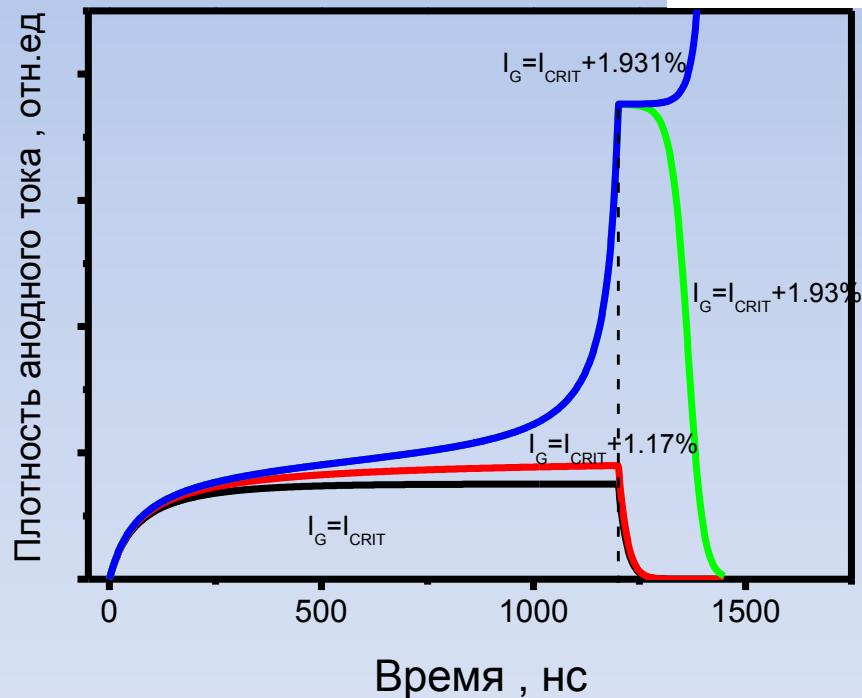
# Особенности статических ВАХ лазера-тиристора



- ❖ Возникновение ветви насыщения плотности тока за счет насыщения скорости фотогенерации за порогом генерации в АО
- ❖ Критически важные параметры при оптимизации р-базы: толщина, концентрация, спектр поглощения

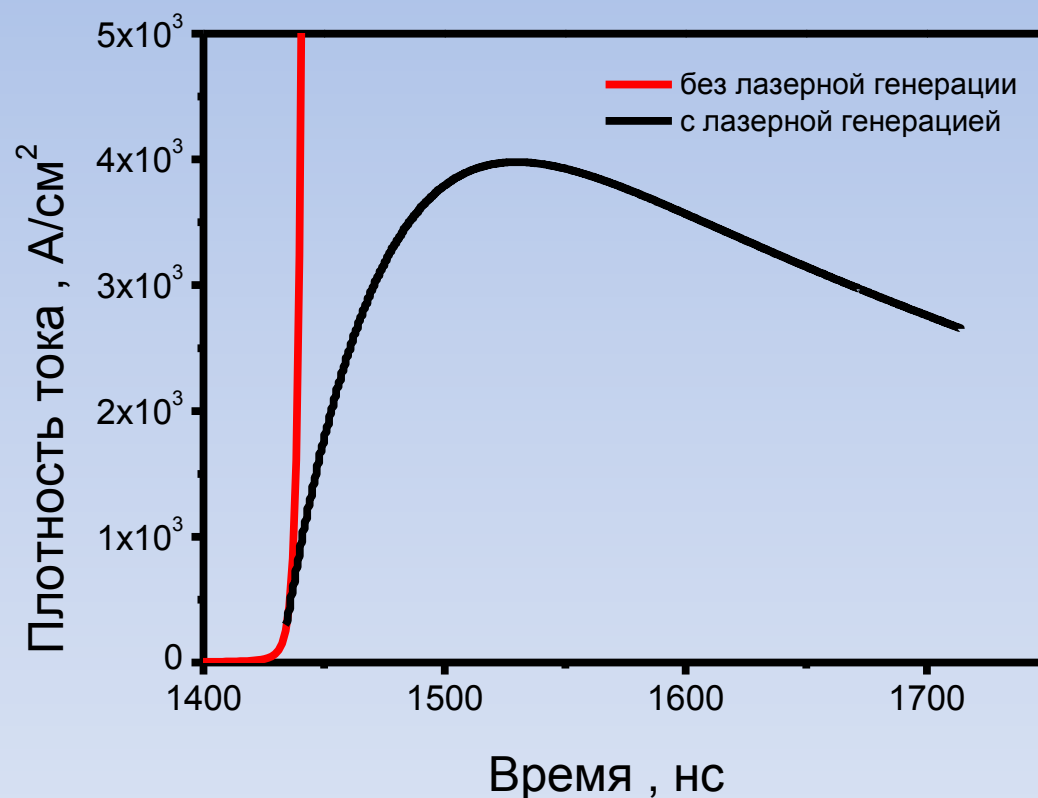
# Динамические характеристики гетеролазера-тиристора. Задержка включения лазерной генерации

$$\frac{dQ_{\text{базы}}}{dt} = R_{\text{ген}} - R_{\text{рек}}$$

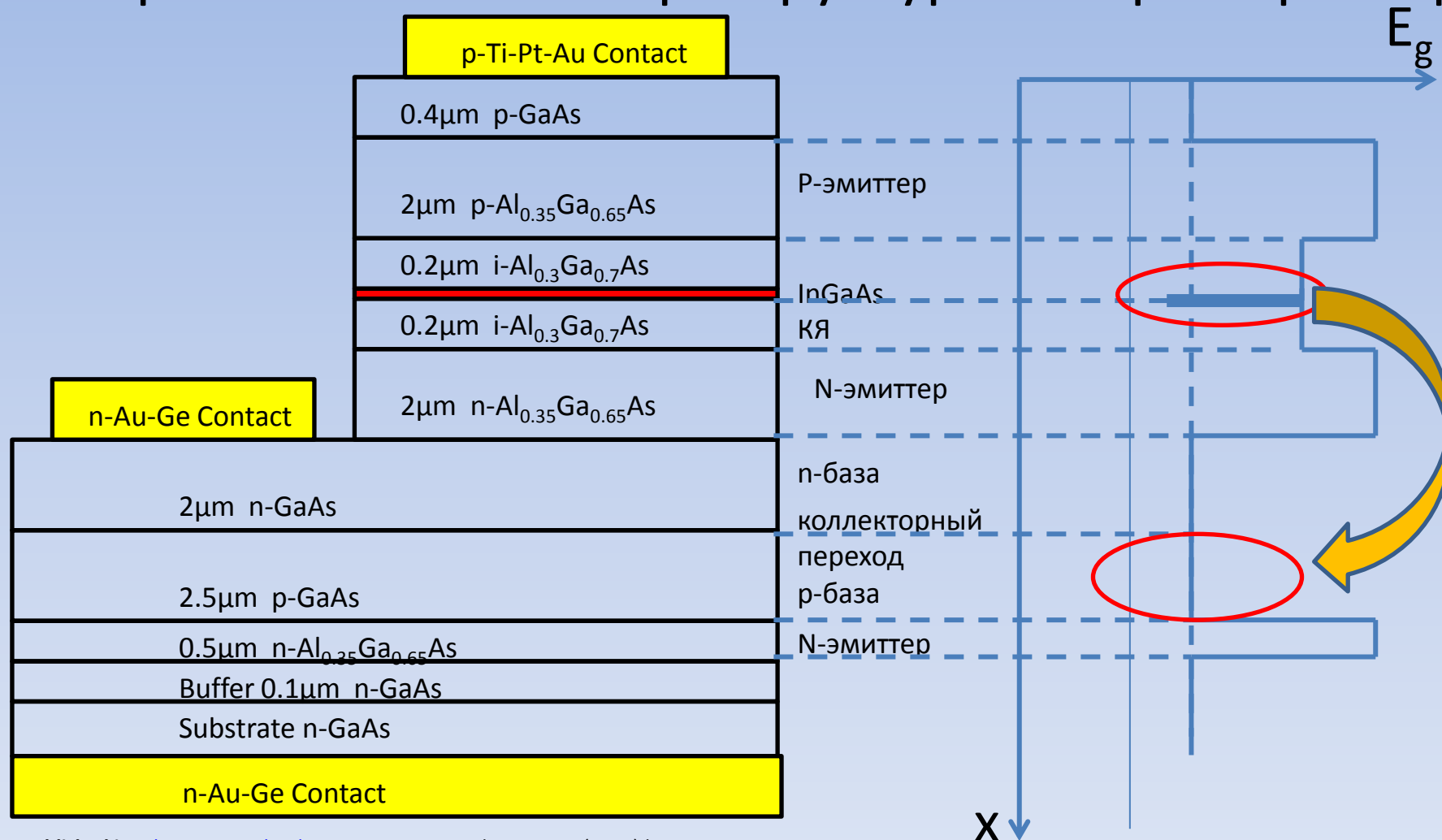


❖ Время задержки включения  $\gg$  времени жизни в базовой области

## Динамические характеристики гетеролазера-тиристора. Задержка включения максимального тока

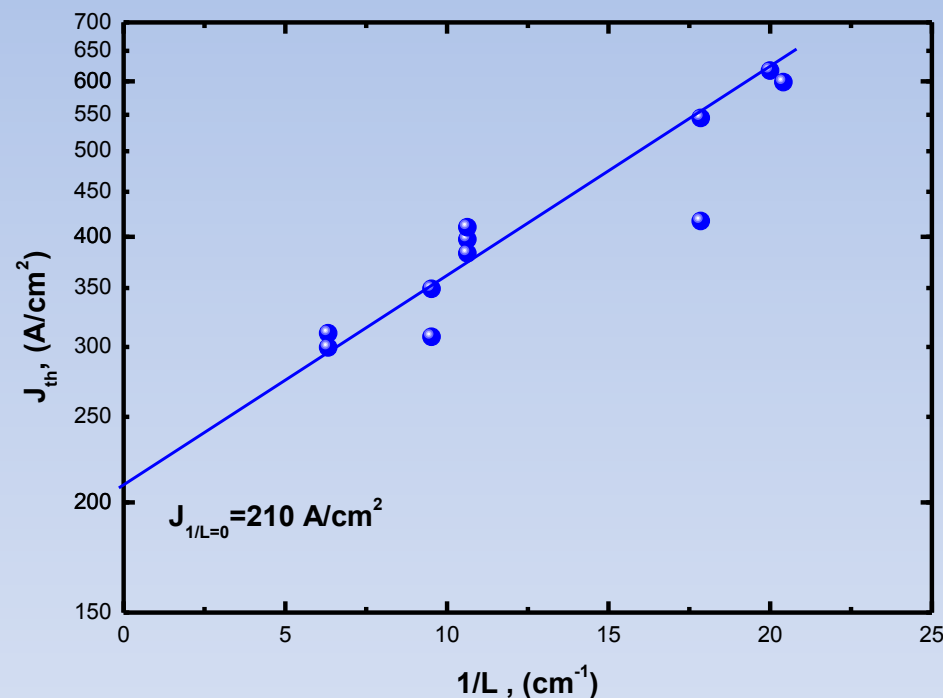
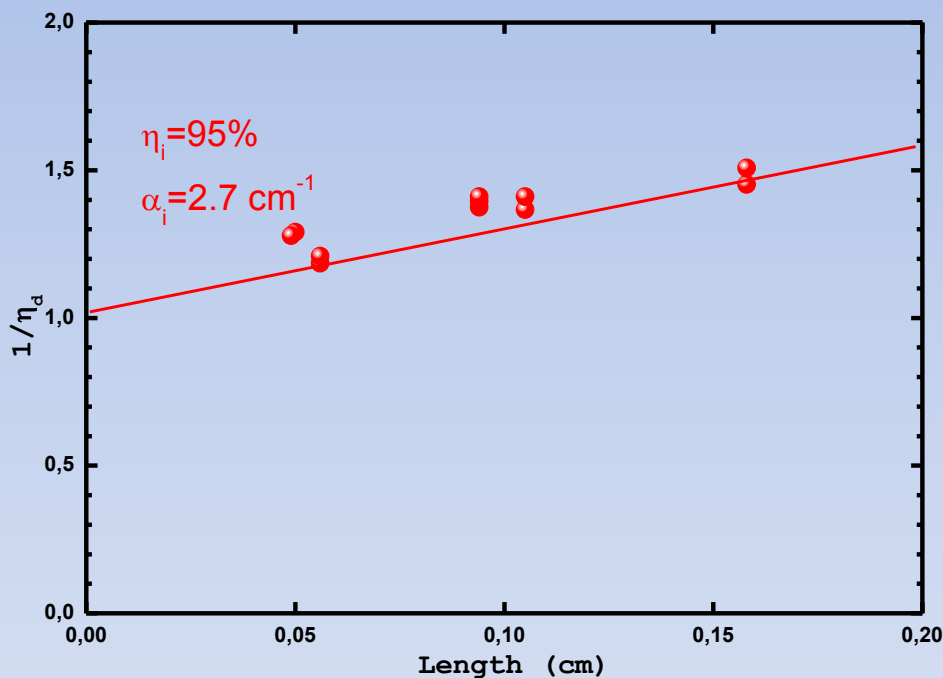


# Экспериментальная гетероструктура лазера-тиристора

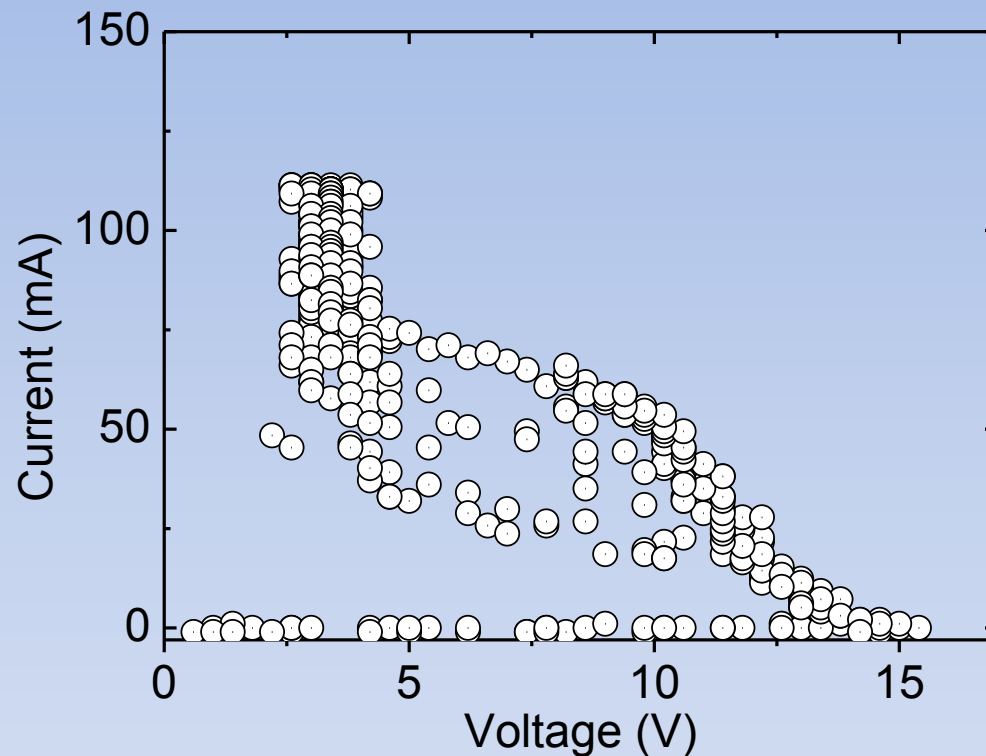


Published in: [Photonics Technology Letters, IEEE](#), Vol.25, No17, (2013) by Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences Stel'makh Research and Development Institute "Polyus"

# Оптические характеристики лазерной гетероструктуры



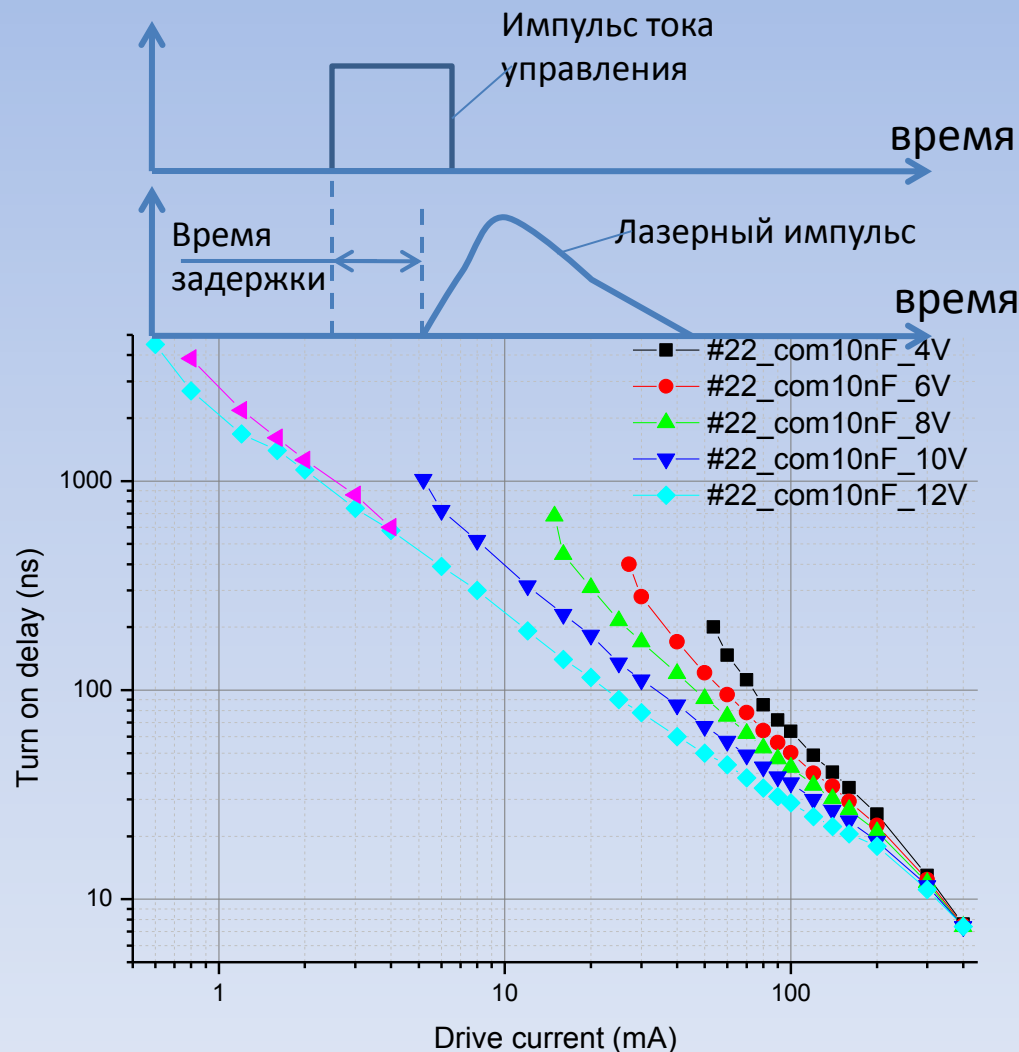
## Квазистатическая ВАХ лазера-тиристора



❖ Максимальное блокирующее напряжение **15 В**

❖ Максимальное блокирующее напряжение ограничено пробоем коллекторного р-n перехода

## Динамические характеристики гетеролазера-тиристора. Задержка включения лазерной генерации

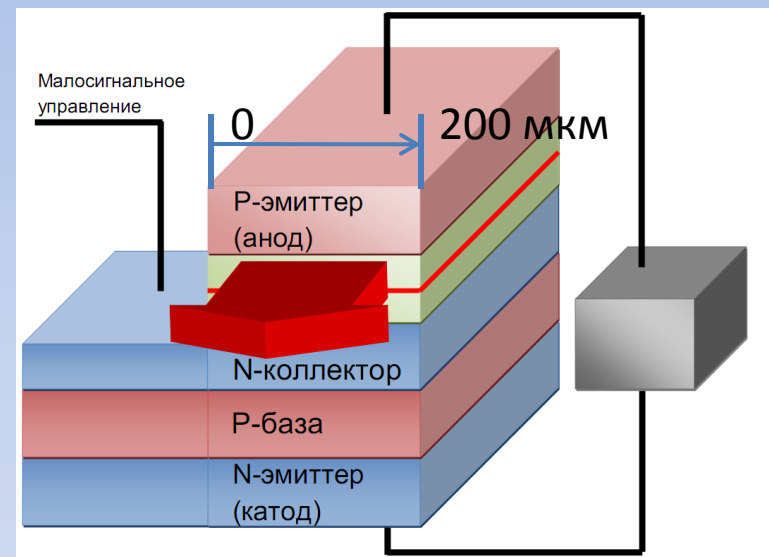
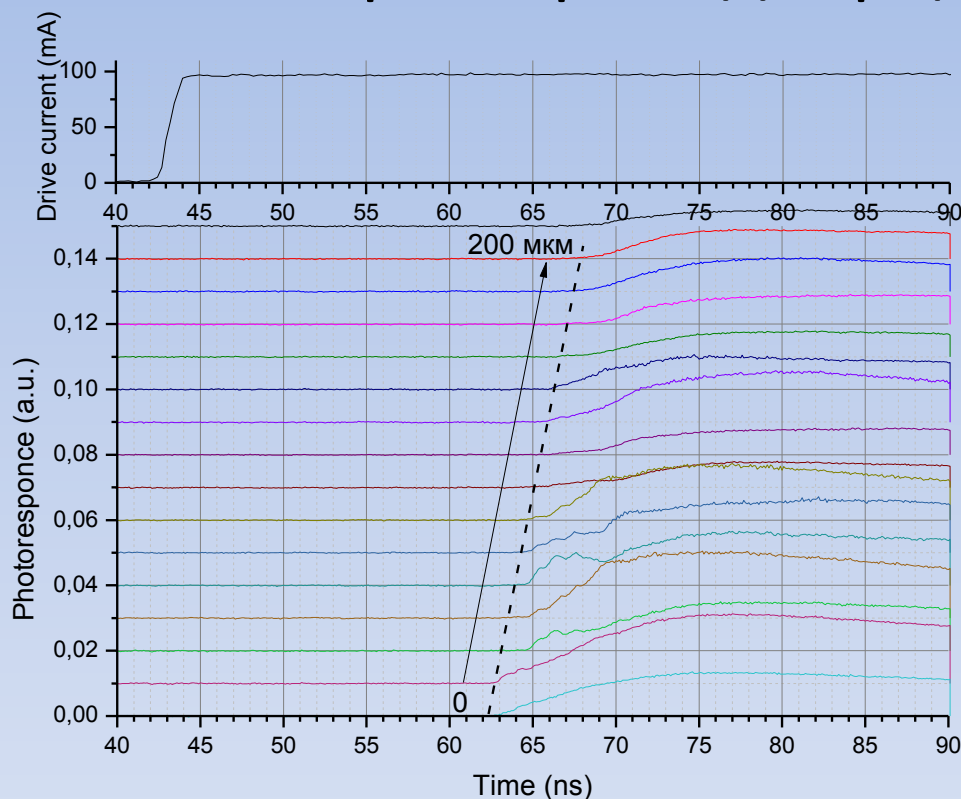


Минимальное время задержки включения **7 нс**

Максимальное время задержки включения **4.5 мкс**

Минимальный ток управления **0.6 мА**

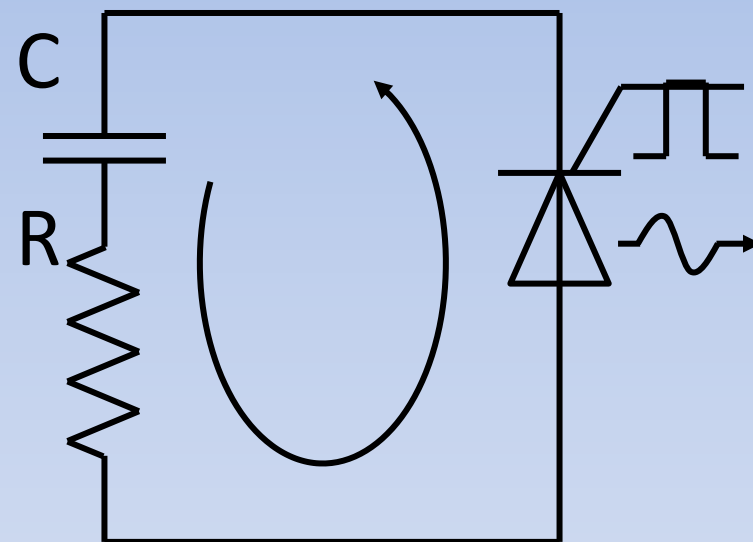
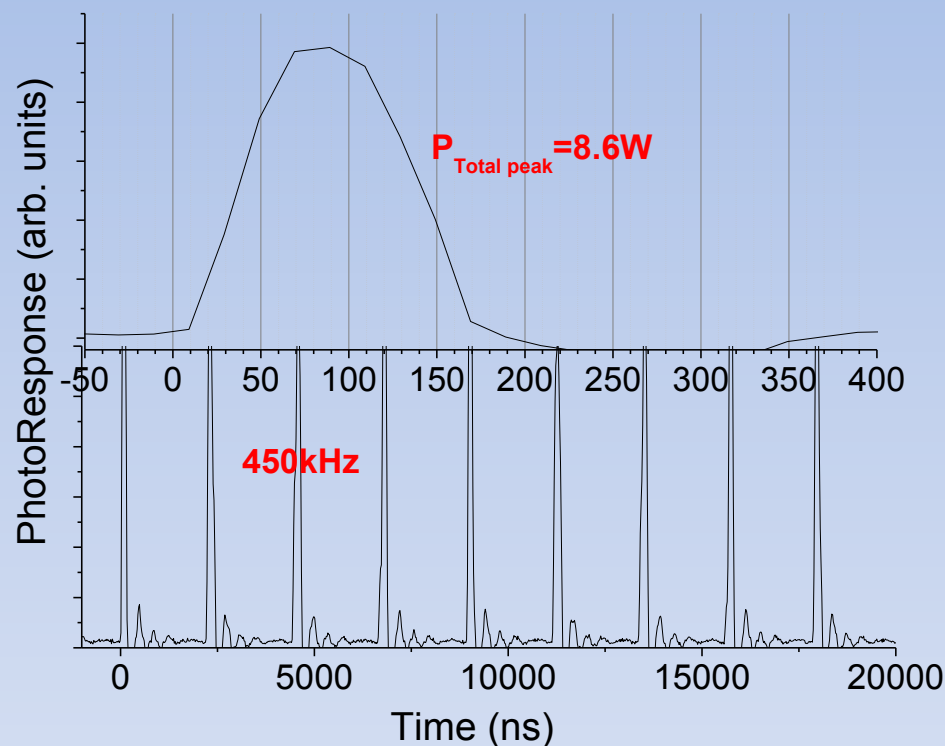
# Динамические характеристики гетеролазера-тиристора. Однородность включения.



- ❖ Оптическая засветка – максимальная однородность включения
- ❖ Задержка включения вдоль излучающей апертуры 200 мкм не более **5 нс**



# Динамические характеристики гетеролазера-тиристора. ВЧ модуляция



❖ Автомодуляция: без внешнего управления

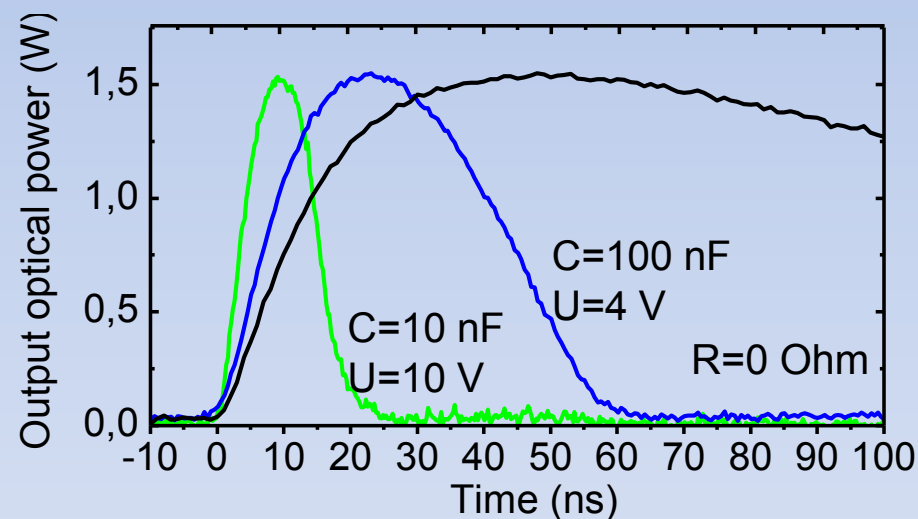
❖ Включение: перенапряжением

Figure 1 is a scatter plot showing the relationship between Peak optical power (W) on the y-axis and Peak pump current (A) on the x-axis. The y-axis ranges from 0 to 30 W, and the x-axis ranges from 0 to 40 A. A secondary x-axis at the top shows Turn-on voltage (V) from 2 to 14 V. The plot includes two data series:  $R=0.5 \text{ Ohm}$  (black triangles) and  $R=0$  (open circles). A dashed line represents the theoretical trend. An inset shows a zoomed-in view of the  $R=0$  data points at higher pump currents, with an arrow pointing to the data point at approximately 25 A and 15 W.

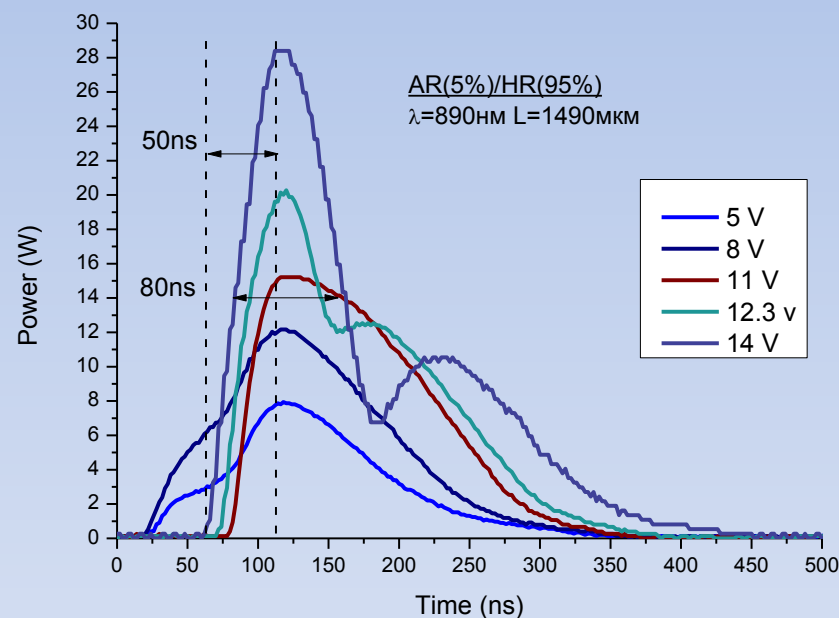
- ❖ Три диапазона рабочих напряжений
- ❖ Максимальная пиковая мощность **28 Вт** при рабочем напряжении **14 В**
- ❖ Пиковый ток **37 А**

# Особенности оптических импульсов лазера-тиристора

Форма оптических импульсов начальной области ВТАХ



Форма оптических импульсов в области максимальной мощности

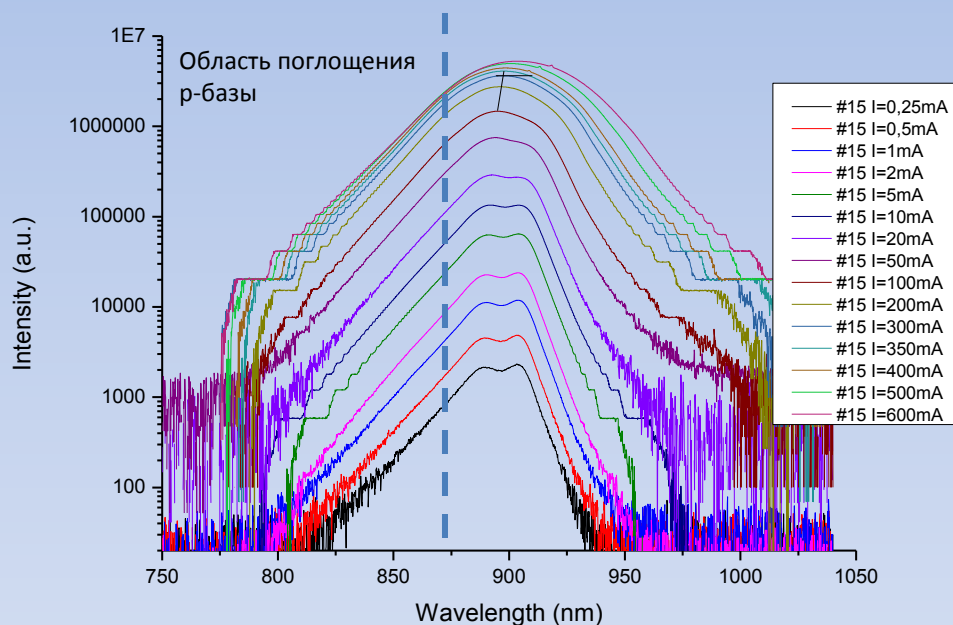


❖ Деформация оптического импульса

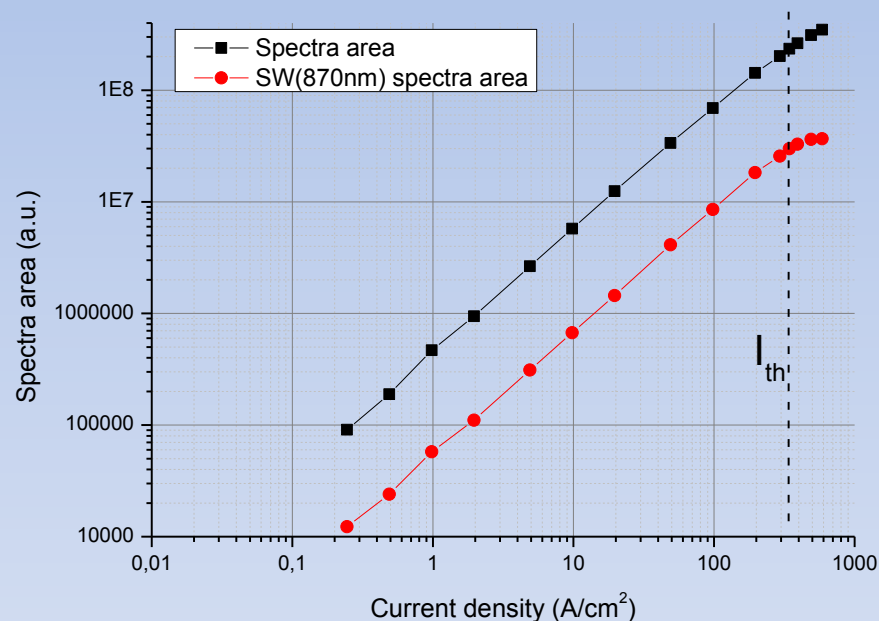
❖ Обострение фронта включения для максимальных напряжений

# Эффективность фотогенерации избыточных носителей в р-базе

## Спектр спонтанного излучения АО

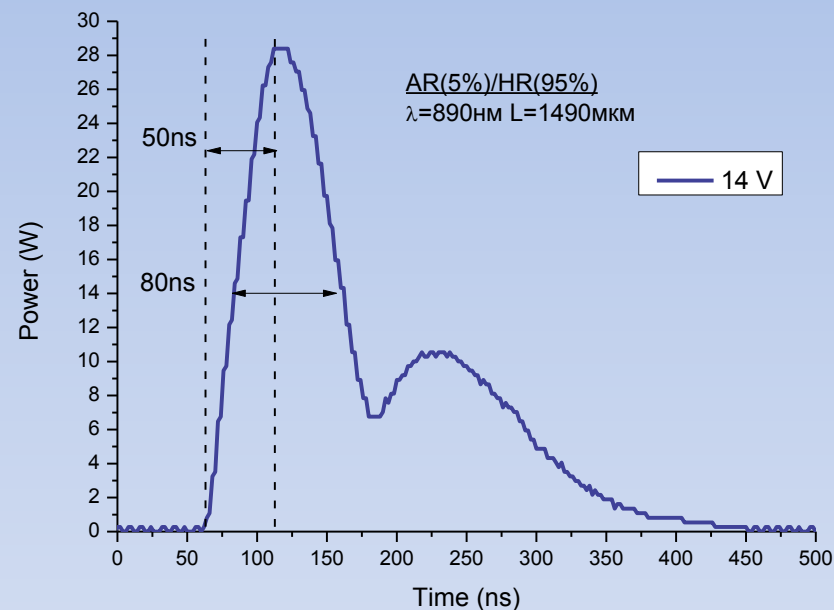
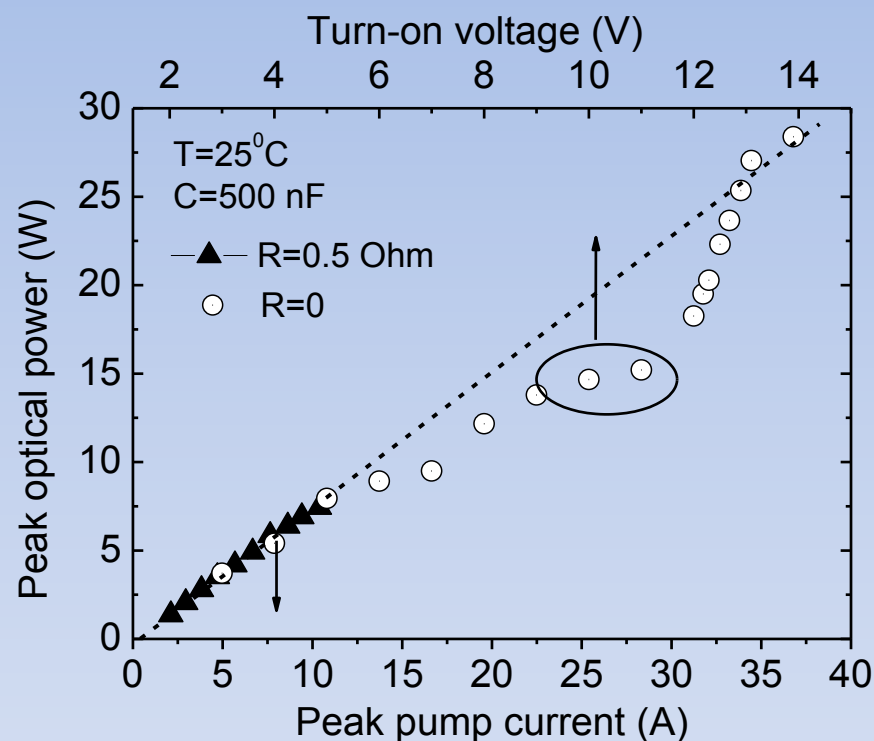


## Часть спектра спонтанного излучения АО эффективно поглощаемая р-базой



❖ Неоптимальное согласование спектров спонтанного излучения АО и поглощения р-базы

## Заключение



❖ Максимальная пиковая мощность **28 Вт** при рабочем напряжении **14 В**