

# **Приборно-технологическое моделирование вольт-амперной характеристики лазерного диода на основе арсенида галлия**

Докладчик: Макулевский Г.Р.

Соавторы: Малый Д.О., Матюхин С.И.

# Цель работы

- Разработка математической модели прямой ветви вольтамперной характеристики лазерного диода на основе AlGaAs

# Задачи

- Изучение факторов, определяющих пороговое напряжение
- Изучение факторов, определяющих дифференциальное сопротивление

# Структура исследуемого лазера

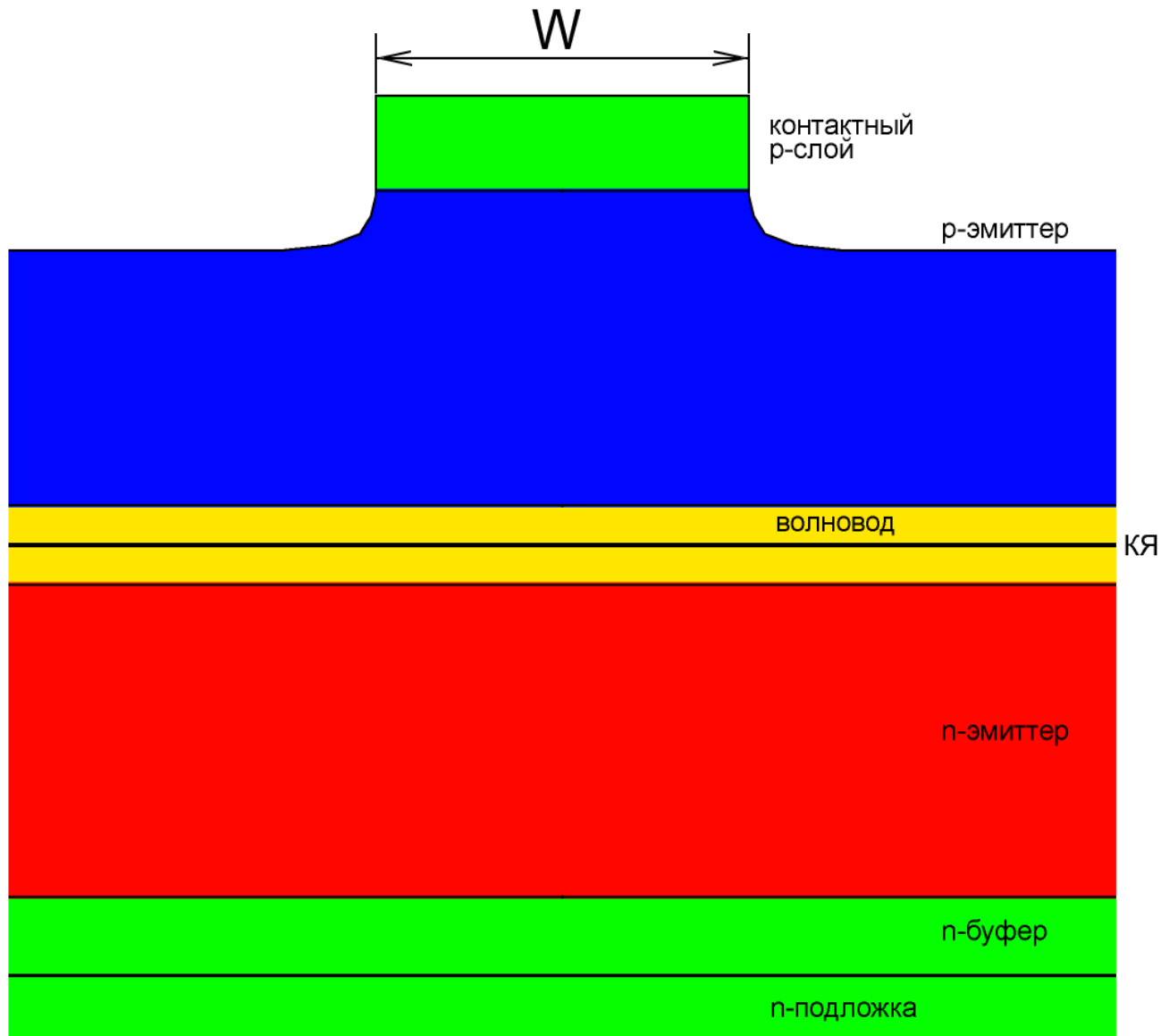
Номер слоя	Слой	Состав	Уровень легирования, $\text{см}^{-3}$	Толщина, мкм	Сопротивление, мОм (значения моделирования)
1	n-подложка	n-GaAs (100)	$2 \cdot 10^{18}$	350	38
2	n-буфер	n-GaAs	$1 \cdot 10^{18}$	0.4	0,093
3	n-эмиттер	$\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$	$8 \cdot 10^{17}$	1.6	3,69
4	волновод	$\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$	не легирован ( $n \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$ )	0.2	420*
5	активная область (КЯ)	$\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$	не легирован ( $n \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$ )	0.012	?**
6	волновод	$\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$	не легирован ( $n \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$ )	0.2	420*
7	p-эмиттер	$\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$	$8 \cdot 10^{17}$	1.6	7,876
8	контактный p-слой	p-GaAs	$4 \cdot 10^{19}$	0.5	0,256

22

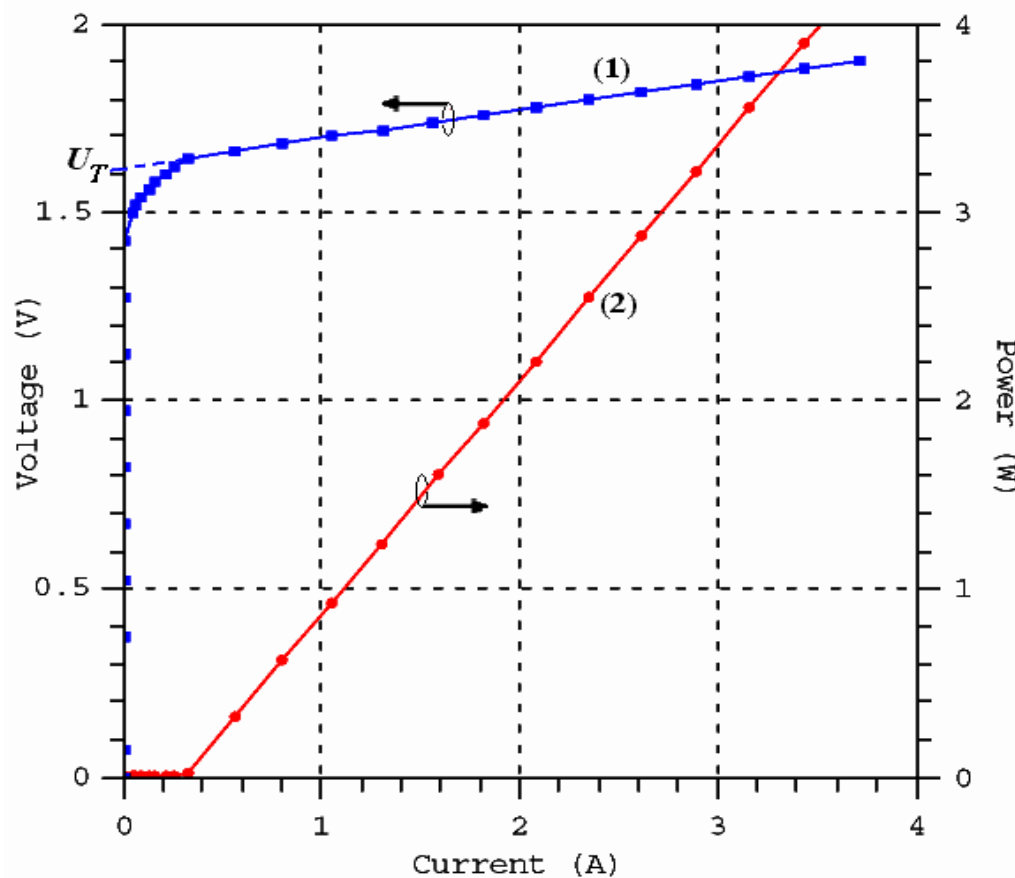
\*отдельно без эмиттеров волноводы дают очень большое значение дифференциального сопротивления.

\*\*отдельно Активную область я не симулировал

# ТИПОВАЯ СТРУКТУРА SCH лазера



# Типичные вольт-амперная (1) и ватт-амперная (2) характеристики полупроводникового лазера на основе AlGaAs



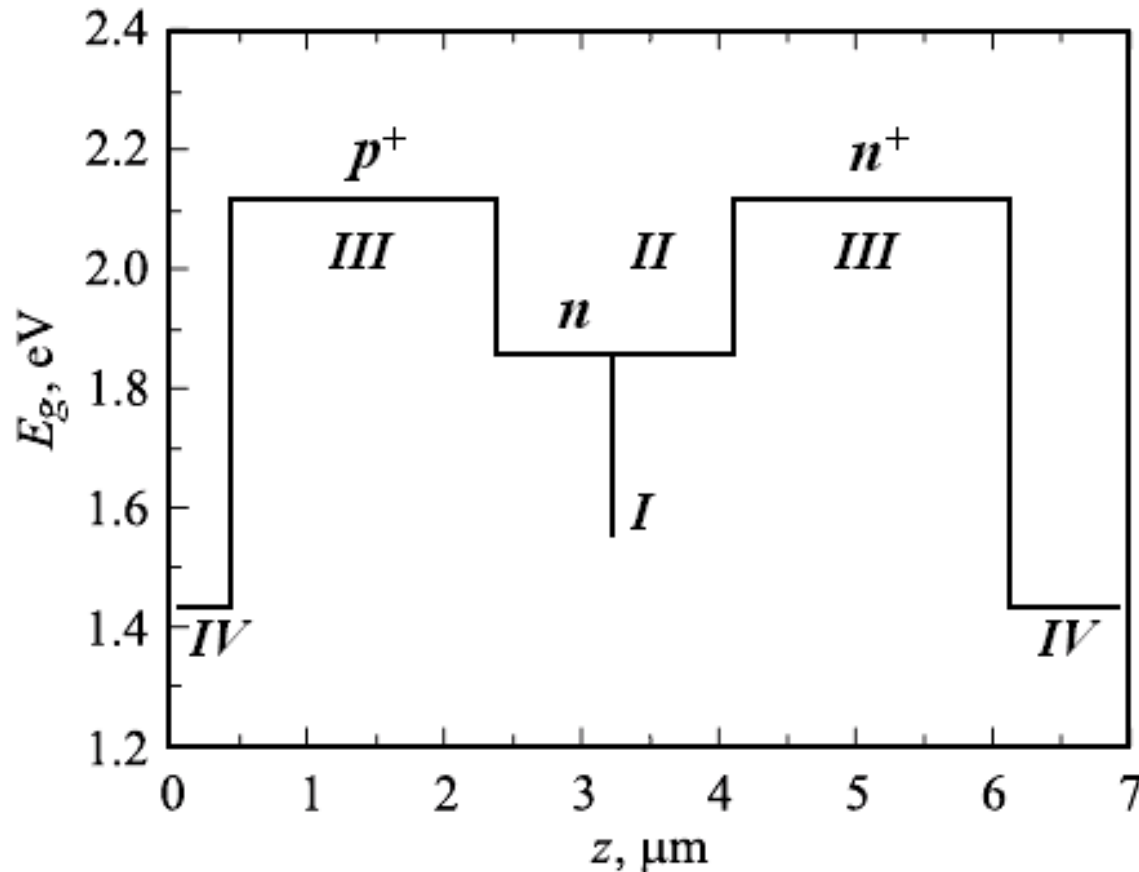
$$U_F \approx U_T + rI_F$$

$U_T$  - Пороговое напряжение

$I_F$  - Прямой ток

$r$  - Дифференциальное сопротивление

# Зонная диаграмма гетероперехода

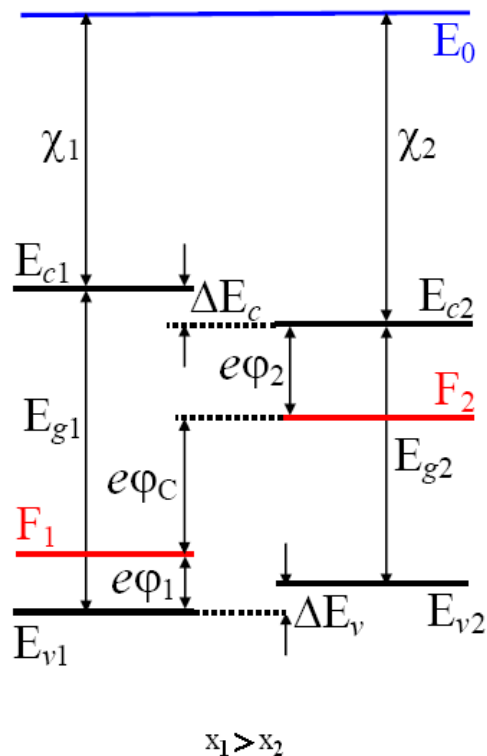


$l_0 = l_{01} + l_{02}$  - Толщина  $p^+$ - $n$  перехода

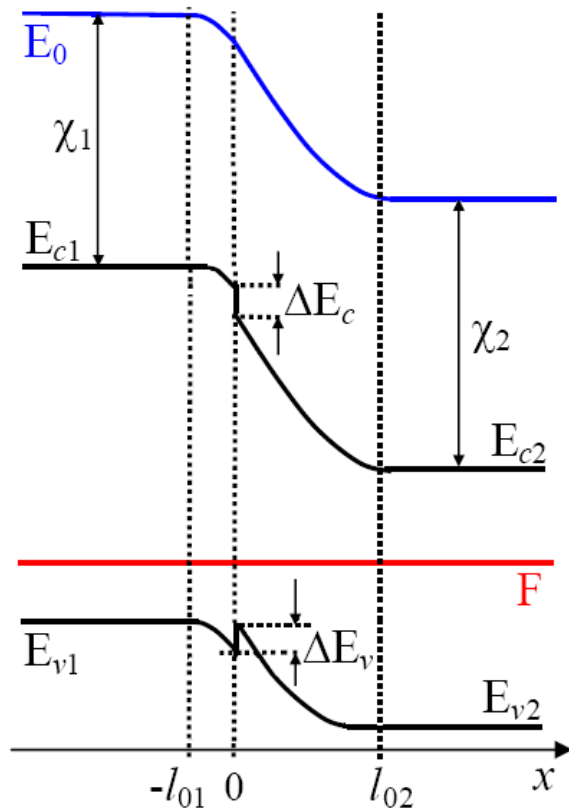
$l_{01}$  - протяженность  $p^+$ - $n$ -перехода в сильнолегированную  $p^+$ -область

$l_{02}$  - протяженность  $p^+$ - $n$ -перехода в слаболегированную  $n$ -область

$p\text{-Al}_{x_1}\text{Ga}_{1-x_1}\text{As}$     $n\text{-Al}_{x_2}\text{Ga}_{1-x_2}\text{As}$



$p\text{-Al}_{x_1}\text{Ga}_{1-x_1}\text{As}$     $n\text{-Al}_{x_2}\text{Ga}_{1-x_2}\text{As}$



$\chi$  – электронное сродство п/п-ков

$E_c$  – дно зоны проводимости

$E_v$  – потолок валентной зоны

F – уровень Ферми

$\phi_c$  – контактная разность потенциалов

$E_g$  – ширина запрещенной зоны

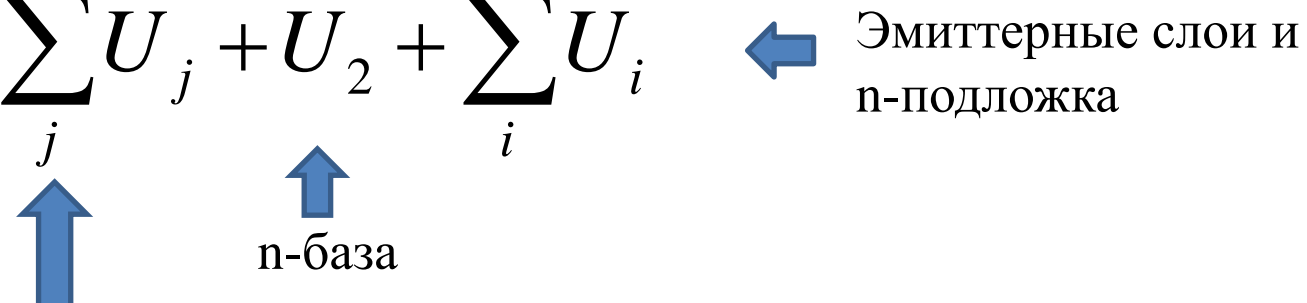
## Сшивка энергетических диаграмм на границе гетероструктуры



# Вольтамперная характеристика лазерного диода в прямом направлении

Суммарное падение напряжения на лазерном диоде:

$$U_F \approx \sum_j U_j + U_2 + \sum_i U_i$$



Гетеропереходы на границах n-базы

n-база

Эмиттерные слои и n-подложка

# Падение напряжения на *h*-базе при высоких уровнях инжекции равно

$$U_2 \approx \frac{1.5kT}{e} \exp\left(\frac{d_2}{2\Lambda_{p2}}\right) + \cancel{\rho_2 \frac{d_2}{S_0} I_F}$$



Учитывает взаимное рассеяние носителей заряда



Учитывает высокий уровень инжекции носителей заряда в базу

- $\Lambda_{p2}$  - амбиполярная диффузионная длина дырок в волноводе
- $k$  - Постоянная Больцмана
- $T$  - Абсолютная температура полупроводников
- $d_2$  - Равная ширине волновода толщина *n*- базы
- $\rho_2$  - Удельное сопротивление, обусловленное взаимным рассеянием
- $S_0$  - Активная площадь гетеропереходов

$$r_2 \approx \frac{1}{I_F} \frac{1.5kT}{e} \exp\left(\frac{d_2}{2\Lambda_{p2}}\right)$$



Дифференциальное сопротивление *n*- базы зависит от тока

# Падение напряжения на p<sup>+</sup>-n и n-p<sup>+</sup> гетеропереходах на границе n-базы

$$I_F = A(T) \cdot \exp\left(\frac{eU_j}{\eta kT}\right)$$

$$U_j = \ln\left(\frac{I_F}{A(T)}\right) \frac{\eta kT}{e}$$

$\eta$  – Параметр связанный с различными физическими свойствам и гетероперехода

$A(T)$  – параметр, зависящий от температуры

# Падение напряжения эмиттерных слоях и на п-подложке

$$\sum_i U_i = I_F \sum_i \rho_i \frac{d_i}{S_0}$$

- вызвано омическим сопротивлением данных слоев

$d_i$  – толщина слоя

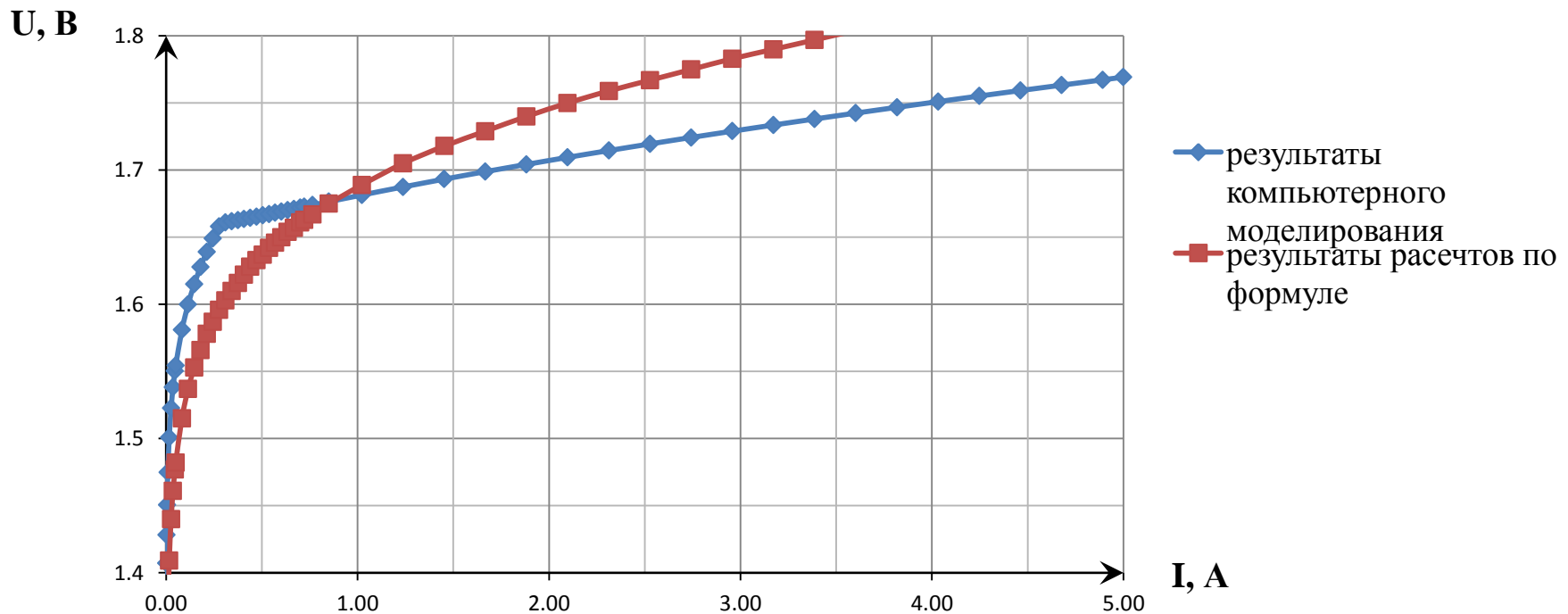
$S_0$  – активная площадь слоя

$\rho_i$  – удельное сопротивление слоя

# Вольтамперная характеристика лазерного диода в развернутом виде

$$U_F = \ln\left(\frac{I_F}{A_1(T)}\right) \frac{\eta_1 kT}{e} + \ln\left(\frac{I_F}{A_2(T)}\right) \frac{\eta_2 kT}{e} + \frac{1.5kT}{e} \exp\left(\frac{d_2}{2\Lambda_{p2}}\right) + I_F \sum_i \rho_i \frac{d_i}{S_0}$$

## Сравнение вольтамперных характеристик



# Вольтамперная характеристика лазерного диода в предельных случаях

При  $U_j \rightarrow \phi_C$        $\phi_C$  - Контактная разность потенциалов p<sup>+</sup>-n  
 гетероперехода  
 $(U_j \rightarrow \phi'_C)$        $\phi'_C$  - Контактная разность потенциалов n-n<sup>+</sup>  
 гетероперехода  
 $l_0 \rightarrow 0$

$\sum_j U_j \approx \alpha(\phi_C + \phi'_C)$  - Напряжение на переходах перестает  
 меняться с током

$$U_F \approx \alpha(\phi_C + \phi'_C) + \frac{1.5kT}{e} \exp\left(\frac{d_2}{2\Lambda_{p2}}\right) + I_F \sum_i \rho_i \frac{d_i}{S_0}$$

$$U_T \approx \alpha(\phi_C + \phi'_C) + \frac{1.5kT}{e} \exp\left(\frac{d_2}{2\Lambda_{p2}}\right) \quad - \text{пороговое напряжение лазерного диода}$$

$$r \approx \frac{1}{I_F} \frac{1.5kT}{e} \exp\left(\frac{d_2}{2\Lambda_{p2}}\right) + \sum_i \rho_i \frac{d_i}{S_0} \quad - \text{дифференциальное сопротивление лазерного диода}$$

# Задачи на будущее

- Построение графиков зависимостей порогового напряжения и дифференциального сопротивления лазерного диода от различных параметров на основе выведенной формулы
- Сравнение теоретических и экспериментальных графиков, полученных на основе компьютерного моделирования

