

# ЕСТЕСТВЕННЫЙ РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ В ГЕТЕРОКОНТАКТАХ Ш-НИТРИДОВ

Филимонов А.В., Бондаренко В. Б.  
[filimonov@rphf.spbstu.ru](mailto:filimonov@rphf.spbstu.ru)



Санкт – Петербургский политехнический университет Петра Великого

# ВВЕДЕНИЕ

125



"Объем создал Бог, а поверхность - порождение дьявола"

В. Паули

- Поверхность (граница) полупроводника является двумерной неупорядоченной системой, где нарушения регулярности структуры и однородности электрических полей связаны не только с возможными дефектами на самой границе, но и с незранированным объемным зарядом электроактивных дефектов в обедненных приповерхностных слоях.
- Размерные эффекты в общем случае представляют собой явления, состоящие в изменении физических свойств с изменением размера в результате возрастания вклада поверхностных процессов или поверхностных свойств по сравнению с объемными.

# Природа поверхностных состояний

- поверхностные состояния Тамма;
- поверхностные состояния Шокли;
- поверхностные состояния, обусловленные дефектами (собственными и примесными) кристаллической решетки на поверхности;
- поверхностные состояния в поле изгиба зон;
- поверхностные состояния, индуцированные полем потенциала изображения.

# Цели и задачи

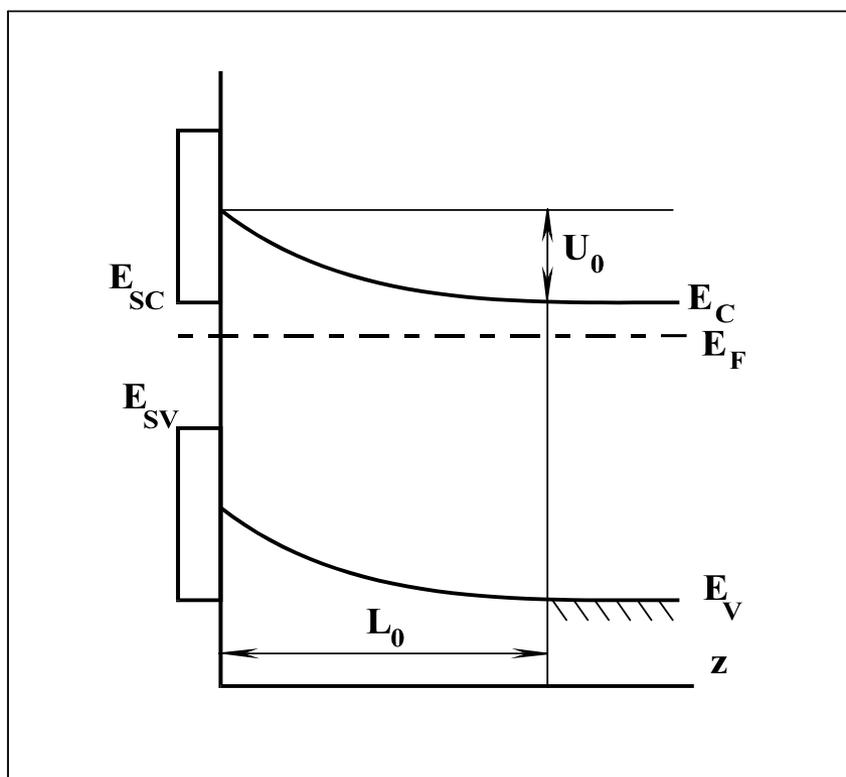
Цель:

Получение информации о природе естественных неоднородностей электрического потенциала на поверхности полупроводника

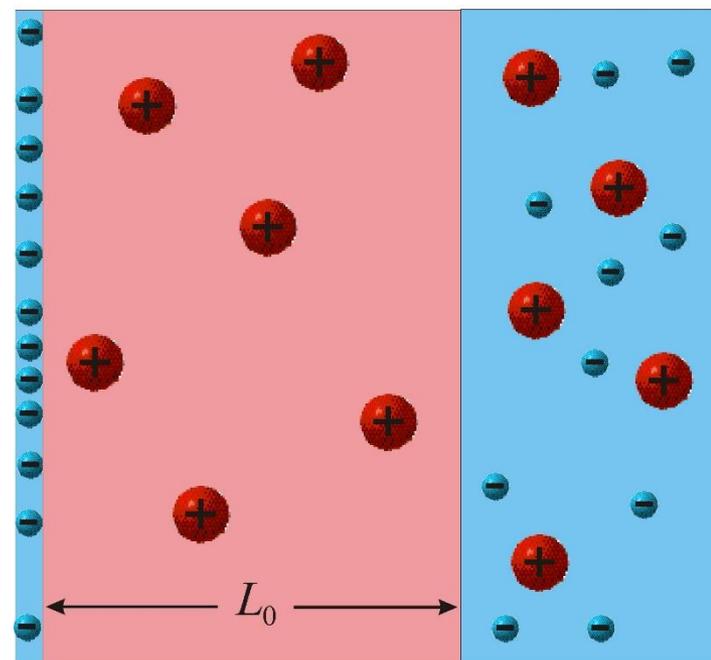
Конкретные научные задачи:

Исследования естественного размерного эффекта в полупроводниковых гетероконтактах на основе Ш-нитридов при распределении объемного заряда на протяжённых линейных дефектах

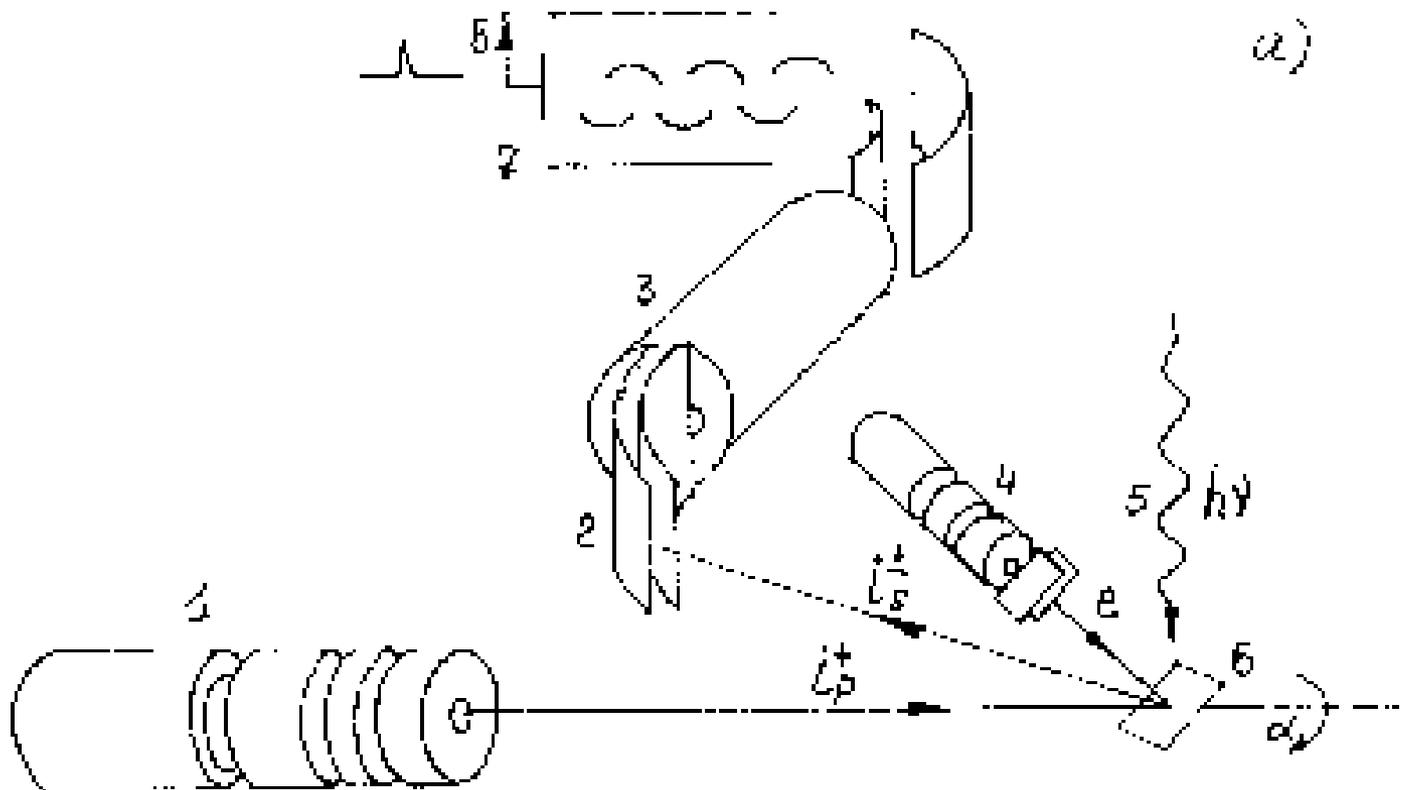
# Трудности стандартной модели области пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника



$$N_0 L_0^3 \sim 1$$

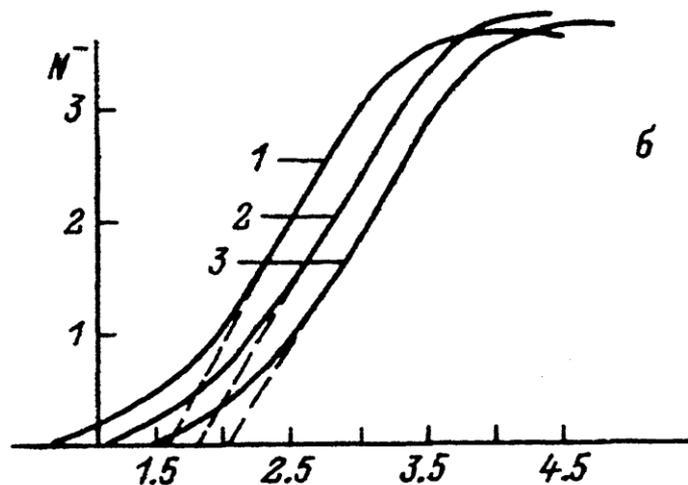
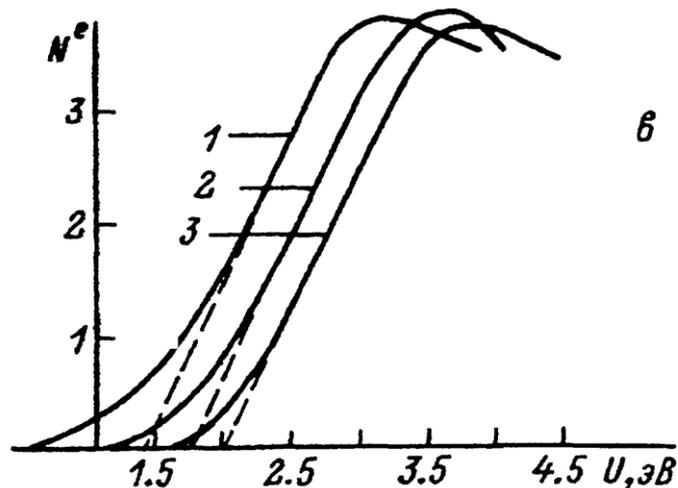
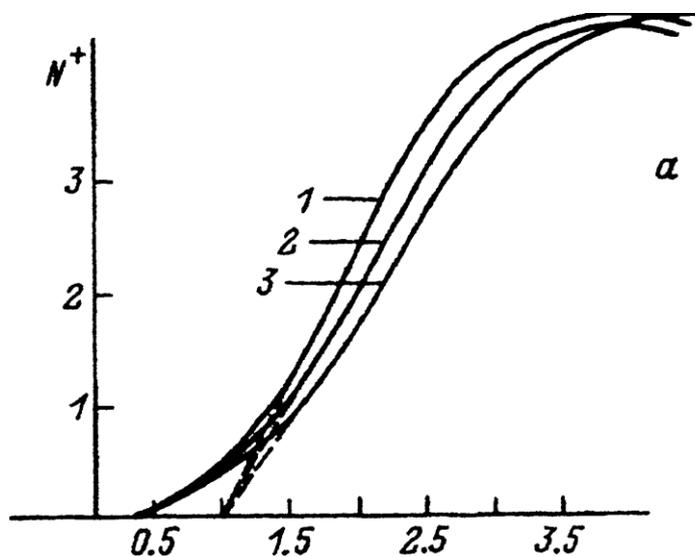


# Экспериментальная установка



Основные узлы экспериментальной установки: 1 - ионная пушка, 2 - энергоанализатор вторичных ионов, 3 - масс-анализатор, 4 - электронная пушка, 5 - образец, 6 - электронный умножитель

# Спектры вторичных ионов

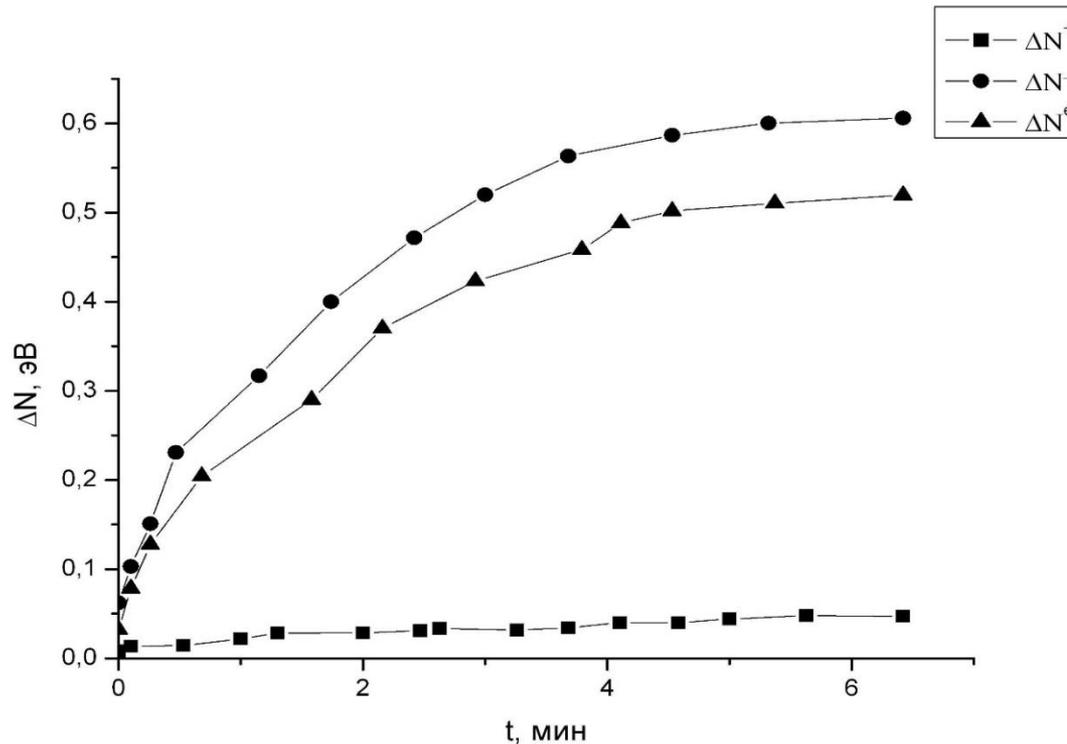


Низкоэнергетические участки спектров вторичных ионов.

а- положительных, б- отрицательных, в- электронов

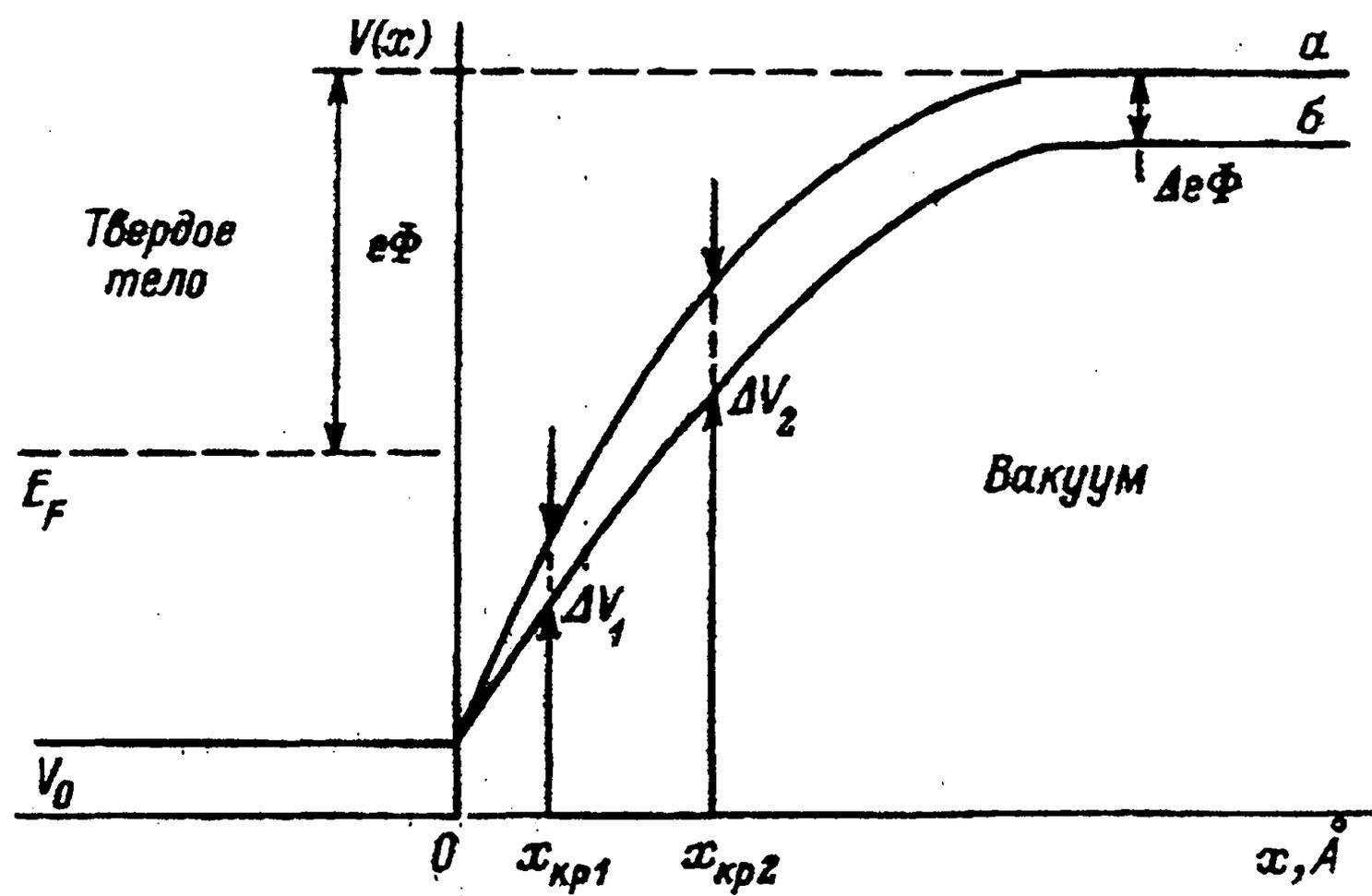
t, мин: 1-5,5 (а), 6,5 (б), 4,5 (в); 2 – 3(а), 1-(б,в); 3- 0 (а-в)

# Смещение энергетического положения спектров



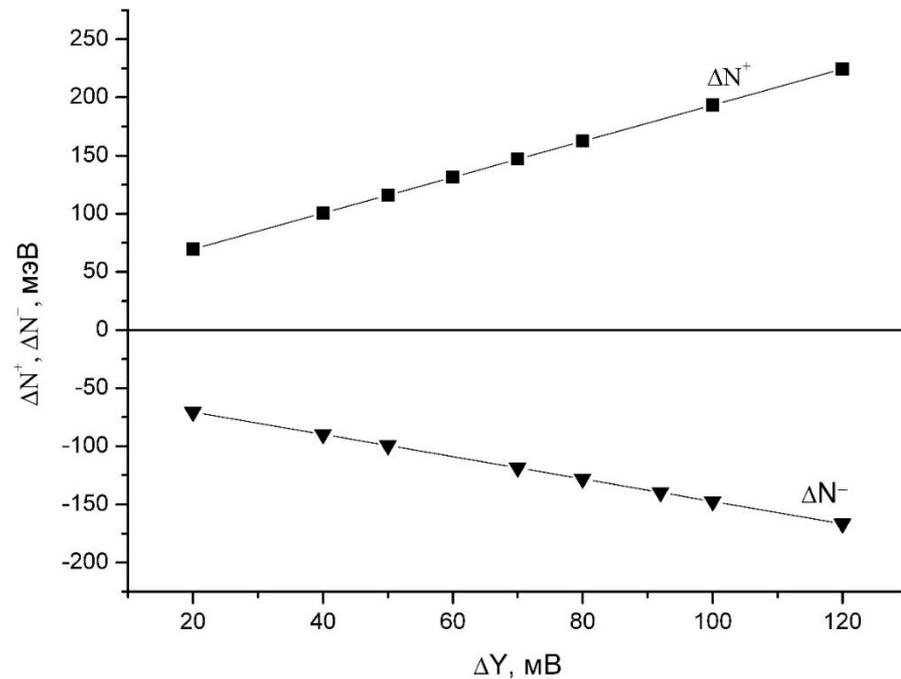
Зависимость смещения энергетического положения спектров вторичных положительных  $N^+$ , отрицательных  $N^-$  ионов и электронов  $N^e$  при адсорбции остаточных газов. Образец GaAs (100),  $n = 1.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , бомбардировка ионами  $Kr^+$ ,  $E_p = 2 \text{ кэВ}$  и электронами.

# Структура потенциального барьера



А.А. Дорожкин, С.Г. Ершов, А.В. Филимонов, Н.Н. Петров "Энергетические спектры вторично - электронной и вторично - ионной эмиссии при изменении работы выхода путем адсорбции", Журнал технической физики, т.64, № 12, 1994, с.132 – 136

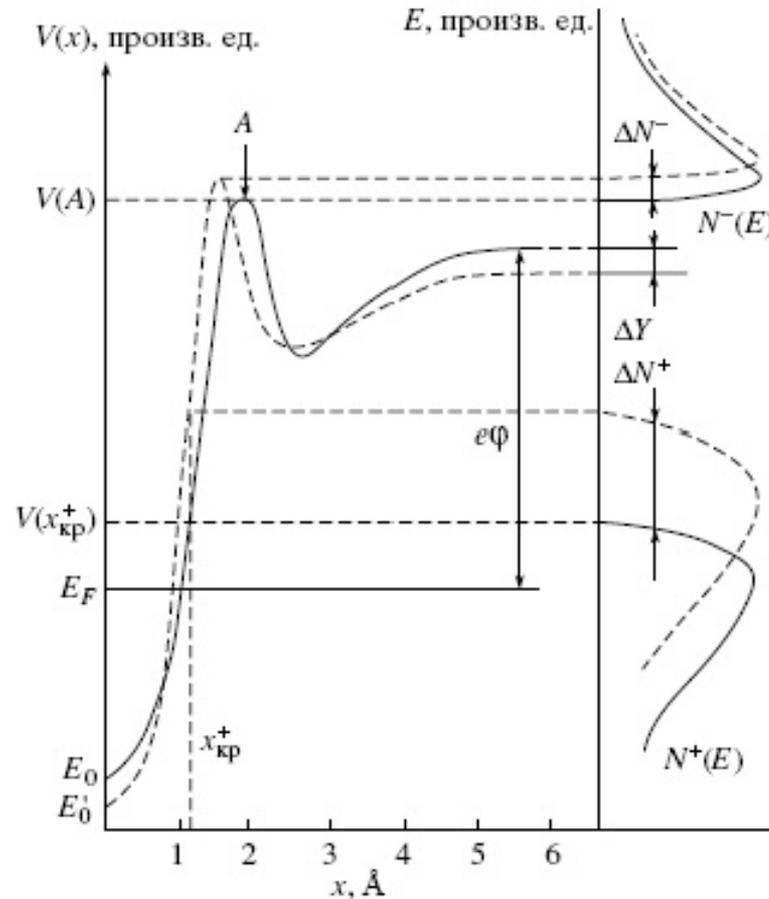
# Спектры вторичных ионов при возбуждении фото ЭДС



Зависимость смещения спектров энергий вторичных положительных  $\Delta N^+$  и отрицательных  $\Delta N^-$  ионов от величины фотоЭДС  $\Delta Y$ . Образец  $GaAs(100)$ ,  $n = 1.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  бомбардировка ионами  $Kr^+$ ,  $E_p = 2 \text{ кэВ}$ , облучение  $He-Ne$  лазером,  $I_{hv} = 7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

А.А. Дорожкин, С.Г. Ершов, А.В. Филимонов "Энергетические спектры вторичных ионов при возбуждении поверхностной фото - ЭДС", Известия РАН, серия физическая, т.58, № 3, 1994, с.68-71

# Форма потенциального барьера



А.В. Филимонов, В.Б. Бондаренко, Е.Ю. Королева “Теоретическое и экспериментальное исследование тонкой структуры потенциального барьера на поверхности полупроводника”, Поверхность, физика, химия, механика., №7, 2006, с78 - 83

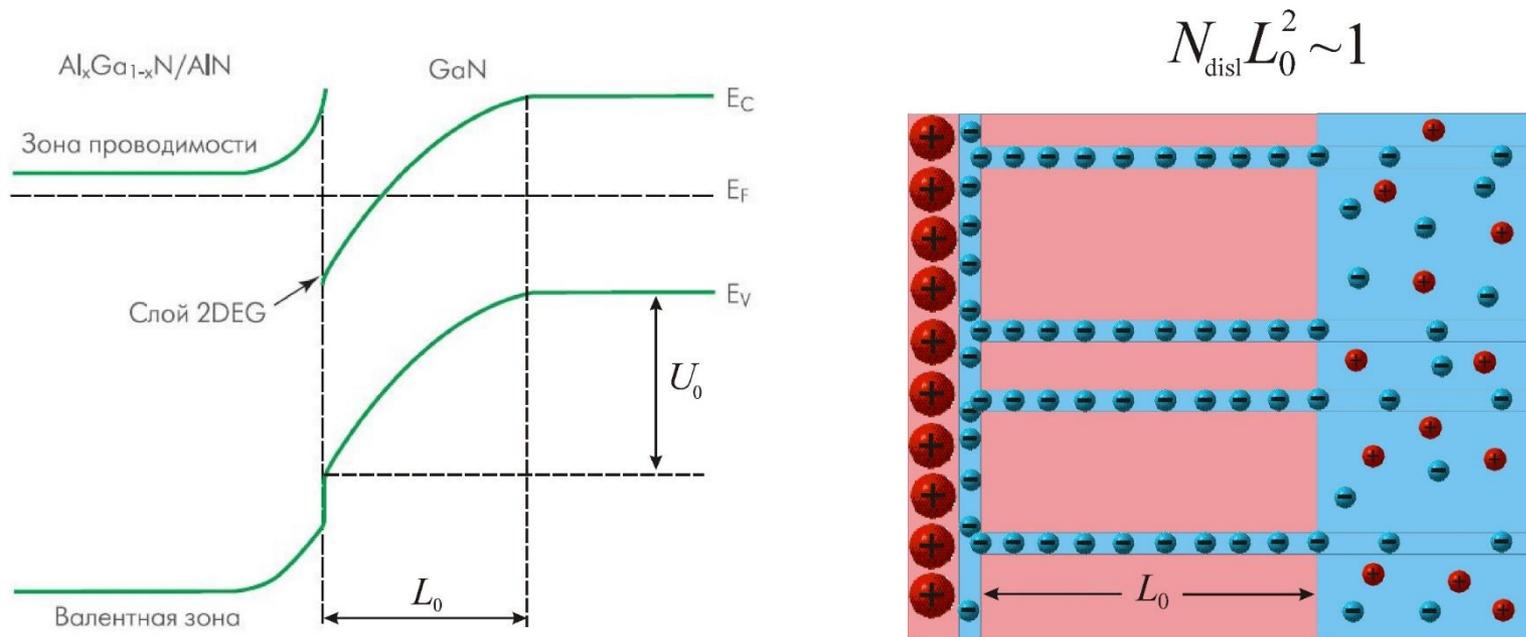
# Предварительные выводы:

- Потенциальный барьер на границе полупроводник — вакуум имеет протяженную тонкую структуру.
- В слоях пространственного заряда у поверхности полупроводника имеется *естественный размерный эффект* — сравнимость масштаба ОПЗ со средним расстоянием между электроактивными дефектами.

# Естественные неоднородности поля и потенциала у поверхности и в контактах

- Естественные неоднородности электрического поля и потенциала на поверхности полупроводника при равномерном распределении легирующей примеси.
- Влияние дисперсии диэлектрической проницаемости при экранировании электрического поля на поверхности полупроводника.
- Хаотический потенциал на поверхности легированного полупроводника при равновесном распределении примеси.
- Хаотический потенциал на поверхности компенсированного полупроводника в условиях самоорганизации электроактивных дефектов.
- Хаотический потенциал в контактах поверхностно-барьерных структур. Естественные неоднородности высоты барьера Шоттки. Поле и потенциал в гетероконтактах.

# Естественный размерный эффект в гетероконтактах III-нитридов



Слой 2DEG (двумерный электронный газ) формируется в процессе инжекции электронов из-за значительного пьезоэффекта и спонтанной поляризации в гетероконтакте. При этом в области изгиба зон в GaN объёмный заряд образован заряженными прорастающими дислокациями несоответствия.

$N_{\text{disl}}$  - поверхностная концентрация заряженных дислокаций

# Расчёт электрического поля в гетероконтакте методом электростатических изображений (модель «проводящей» поверхности)

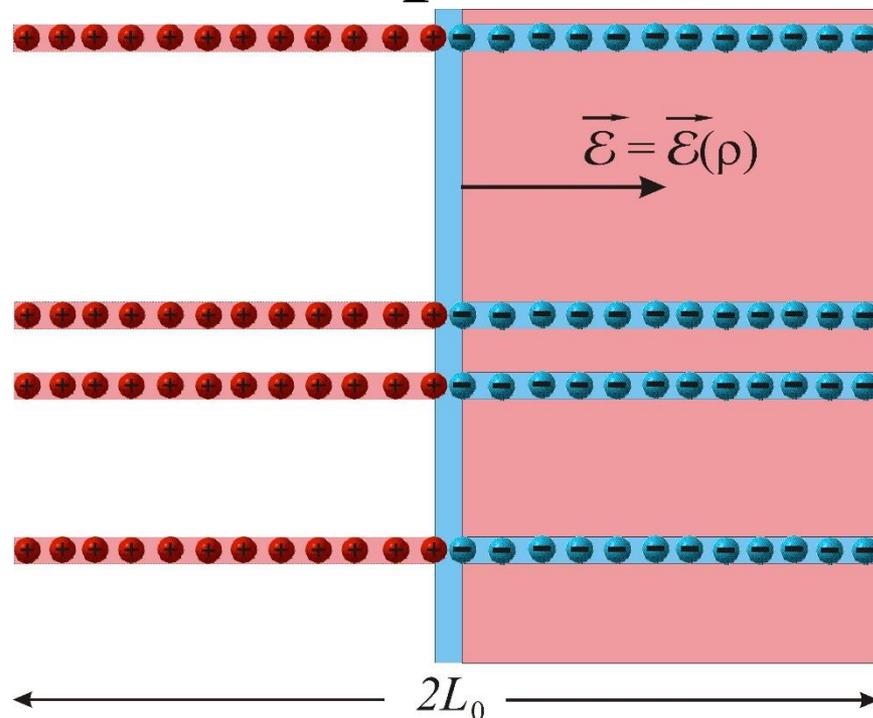
$$\mathcal{E}_i(\rho) = \frac{2\lambda}{\varepsilon} \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\sqrt{\rho^2 + L_0^2}} \right)$$

- напряжённость поля, созданная  $i$ -й дислокацией в плоскости контакта на расстоянии  $\rho$  (поле «распределённого диполя»)

$$L_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon U_0}{2\pi e \lambda N_{\text{disl}}}} \text{ - характеристическая ширина ОПЗ}$$

$\lambda$  - линейная плотность заряда дислокации

$$E(\rho) = \sum E_i(\rho)$$



# Статистический анализ

$p(N) = \frac{\langle N \rangle^N \exp(-\langle N \rangle)}{N!}$  - распределение по количеству дислокаций на участке контакта радиуса R (пуассоновский ансамбль)

$\langle N \rangle = N_{\text{disl}} \pi R^2$  - среднее число дислокаций на участке контакта радиуса R

$\delta N(R) = R \sqrt{\pi N_{\text{disl}}}$  - характерные флуктуации числа дислокаций на участке контакта радиуса R

Другими словами, напряжённость электрического поля в контакте случайная величина. Статистический анализ приводит к результату:

$$\delta \mathcal{E} = \frac{4\lambda \sqrt{\pi N_{\text{disl}}}}{\varepsilon}$$

Для типичных значений параметров системы ( $\varepsilon \sim 10$ ,  $U_0 \sim 1$  эВ,  $\lambda \sim 0.01$  СГСЭ)

$$\frac{\delta \mathcal{E}}{\langle \mathcal{E} \rangle} = \sqrt{\frac{2e\lambda}{\varepsilon U_0}} \sim 1$$

Бондаренко В. Б., Филимонов А. В., Kumar R. «Хаотический потенциал заряженных дислокаций в гетероконтактах III-нитридов» Письма в Журнал технической физики. 2021. Т. 47. No 1. С. 12–14

# Неоднородности потенциала в гетероконтактах Ш-нитридов

- В двумерных электронных системах ослаблено экранирование (степенной характер экранированного поля вместо экспоненциального);
- Обостряются эффекты локализации (квазиклассически более высокий уровень протекания в двумерных системах);
- Относительно малая плотность электронных состояний в контактах Ш-нитридов вследствие малости величины эффективной массы электронов.

В приближении Томаса-Ферми неоднородности потенциала пропорциональны флуктуациям напряжённости электрического поля:

$$\delta U = \frac{\lambda}{eD_s} \cdot \sqrt{\frac{N_{\text{disl}}}{\pi}}, \text{ где } D_s \text{ – плотность поверхностных состояний}$$

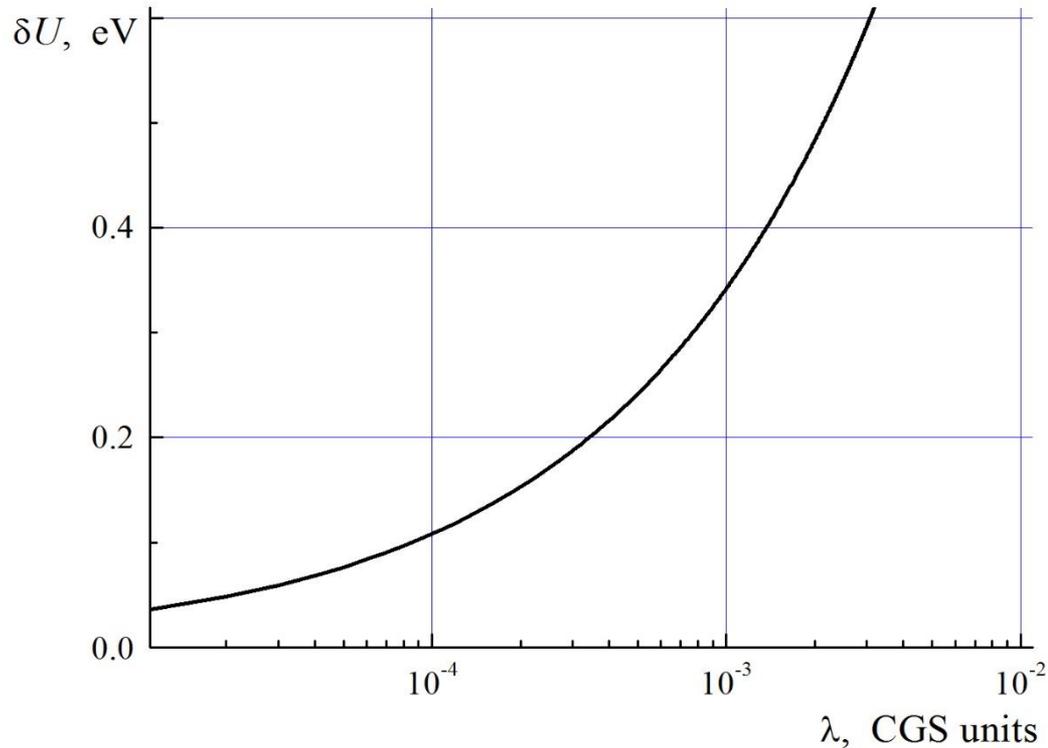
При учёте дисперсии диэлектрического отклика двумерного электронного газа на границе двух полупроводников с диэлектрическими проницаемостями  $\epsilon_1 \approx \epsilon_2 \sim 10$  характерный масштаб флуктуаций потенциала  $R_0$  конечен и сравним с расстояниями между дислокациями:

$$R_0 \approx \sqrt{\frac{2L_0}{q_s}}, \text{ где } q_s = 4\pi e^2 D_s / (\epsilon_1 + \epsilon_2) \text{ – параметр экранирования в 2D-системе.}$$

В условиях локализации двумерного электронного газа характерная величина флуктуаций хаотического потенциала заряженных дислокаций в гетероконтакте от линейной плотности заряда имеет вид

$$\delta U = \frac{2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \sqrt{2e\lambda\epsilon_2 U_0}$$

# Хаотический потенциал заряженных дислокаций в гетероконтакте при локализации 2DEG



Зависимость средней величины флуктуаций хаотического потенциала заряженных дислокаций в гетероконтакте AlGaIn/GaN от линейной плотности заряда. Величина изгиба зон  $U_0 = 1.8$  эВ

# Выводы

- В гетероконтактах III-нитридов в широком диапазоне параметров существует *естественный размерный эффект*, связанный с практической эквивалентностью масштабов длины экранирования (ширины ОПЗ) и среднего расстояния между протяжёнными электроактивными дефектами – заряженными дислокациями.
- Естественный размерный эффект в реальных гетероконтактах III-нитридов исключает статистическое усреднение по большому количеству источников поля, формирующих ОПЗ, и обуславливает неизбежные неоднородности электрического поля и потенциала в данных структурах.
- Возникающие флуктуации напряжённости электрических полей в указанных контактах по порядку величины сравнимы со средними значениями приконтактных полей.
- В силу известного ослабления экранирующей способности двумерного электронного газа и малой величины плотности поверхностных состояний естественный размерный эффект приводит к формированию протяжённого (не мелкомасштабного) хаотического потенциала и частичной (или полной) локализации 2DEG.
- При наличии эффектов локализации электронного заряда в гетероконтактах III-нитридов величина амплитуды хаотического потенциала может превышать значение 100 мэВ.

СПАСИБО ЗА  
ВНИМАНИЕ!



# Равновесное состояние ОПЗ полупроводника (1)

- время  $\tau$  диффузии примеси на масштаб ОПЗ

$$\tau = \frac{L_0^2}{\mathfrak{R}} \quad (1)$$

$$\mathfrak{R} = \mathfrak{R}_0 \cdot \exp(-Q/RT) \quad (2)$$

$$\frac{dN(z)}{dz} - eF(z) \cdot \frac{N(z)}{kT} = 0 \quad F(z) = (1/e)dU(z)/dz \quad (3)$$

$$U_0 \gg kT \quad N(z) = \frac{N_0}{\cos^2[(L-z)/2\ell]} \quad (4)$$

$$\ell = \sqrt{\epsilon kT / 8\pi e^2 N_0} \quad (5)$$

# Равновесное состояние ОПЗ полупроводника (2)

$$\frac{d^2U(z)}{dz^2} = \frac{4\pi e^2}{\varepsilon} N_0 \cdot \frac{1}{\cos^2\left[\frac{(L-z)}{2\ell}\right]} \quad (6)$$

$$U(L) = 0 \quad U = -2kT \cdot \ln \cos\left(\frac{L-z}{2\ell}\right) \quad (7)$$

$$L = 2\ell \cdot \arccos\left[\exp\left(-\frac{U_0}{2kT}\right)\right] \quad (8)$$

$$\ell = \sqrt{\frac{\varepsilon kT}{8\pi e^2 N_0}} \quad - \text{длина экранирования}$$

# Равновесное состояние ОПЗ полупроводника: случай сильных полей у поверхности (3)

$$\left. \frac{dU}{dz} \right|_{z=0} = -\frac{kT}{\ell} \cdot \sqrt{\exp\left(\frac{U_0}{kT}\right) - 1} \quad (9)$$

$$\frac{dN(z)}{dz} - \frac{2 \cdot N(z)}{a} \cdot \text{th} \left[ \frac{a}{2kT} \cdot \frac{dU(z)}{dz} \right] = 0 \quad (10)$$

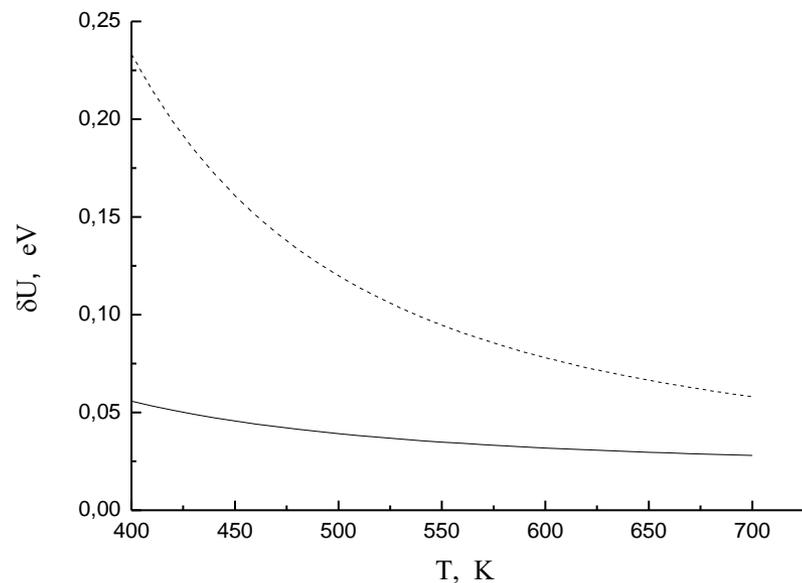
$a$  – длина диффузионного прыжка примесного атома (иона)

Формирование дельта-слоя при условии  $\frac{a}{kT} \cdot \left| \frac{dU}{dz} \right| \gg 1$

$$U(z) = U_0 \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot z}{a}\right) \quad (11)$$

$$N(z) = \frac{\varepsilon U_0}{\pi e^2 a^2} \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot z}{a}\right) \quad (12)$$

# Естественные неоднородности потенциала на поверхности полупроводника при равновесном распределении примеси

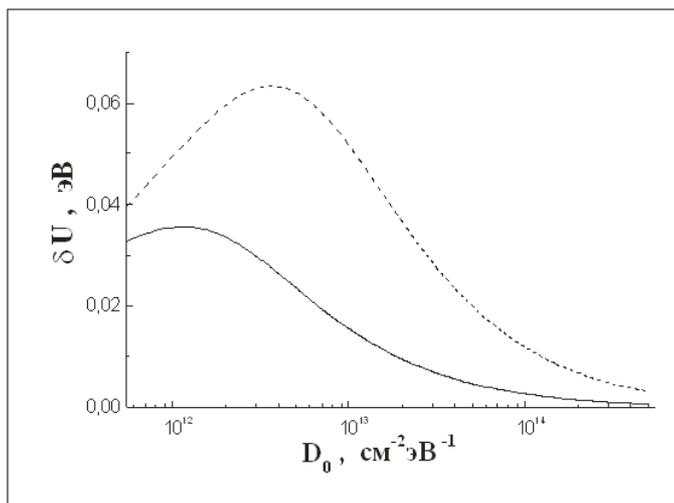


$$\delta U = \frac{kT}{2\sqrt{\pi\ell^3 N_0}} \left[ \operatorname{th} \frac{U_0}{4kT} \cdot \left( 1 - \operatorname{th} \frac{U_0}{4kT} \right) \right]^{-1/2}$$

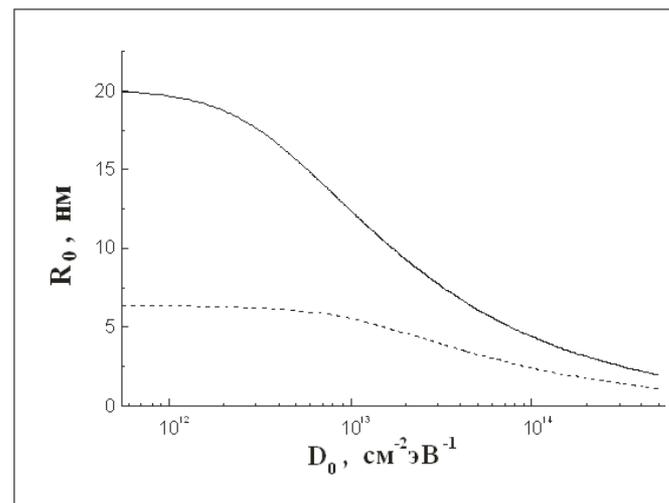
Зависимость естественных неоднородностей потенциала на поверхности легированного Si ( $\epsilon = 12$ ,  $N_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) от температуры формирования равновесного распределения примеси при величинах изгиба зон 0.3 эВ (сплошная кривая) и 0.5 эВ (пунктирная кривая)

В.Б. Бондаренко, С.Н. Давыдов, А.В. Филимонов. «Естественные неоднородности потенциала на поверхности полупроводника при равновесном распределении примеси». ФТП, 2010, Т. 44, № 1, с. 44 - 47

# Влияние дисперсии диэлектрической проницаемости при экранировании электрического поля на поверхности полупроводника

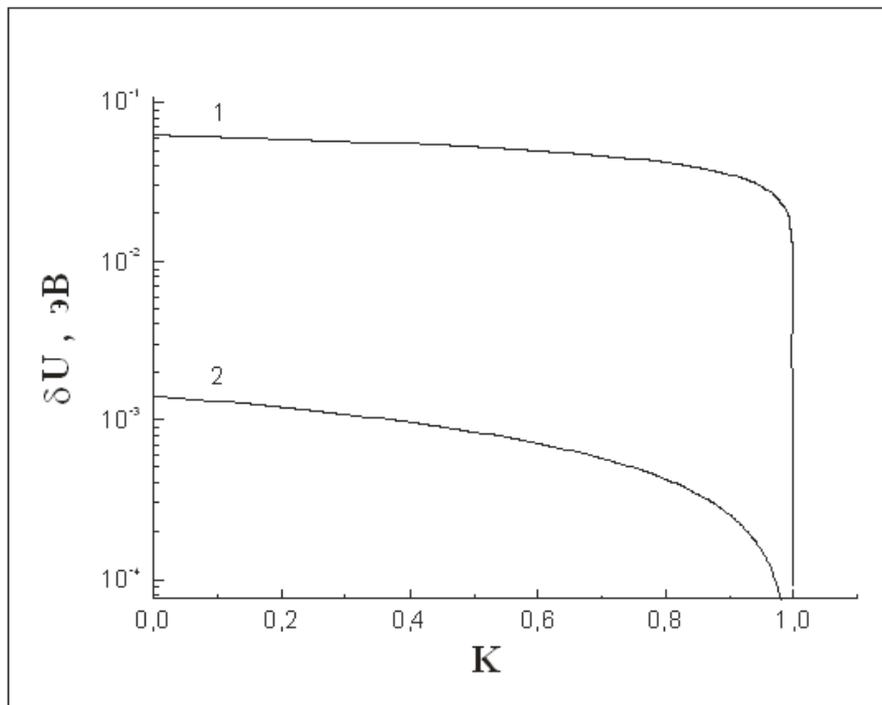


Зависимость естественных неоднородностей потенциала на поверхности сильно легированного Si от плотности поверхностных состояний при концентрациях примеси  $10^{18}\text{cm}^{-3}$  (сплошная кривая) и  $10^{19}\text{cm}^{-3}$  (пунктирная кривая)



Зависимость масштаба естественных неоднородностей потенциала на поверхности сильно легированного Si от плотности поверхностных состояний при концентрациях примеси  $10^{18}\text{cm}^{-3}$  (сплошная кривая) и  $10^{19}\text{cm}^{-3}$  (пунктирная кривая)

# Хаотический потенциал на поверхности компенсированного полупроводника в условиях самоорганизации электроактивных дефектов

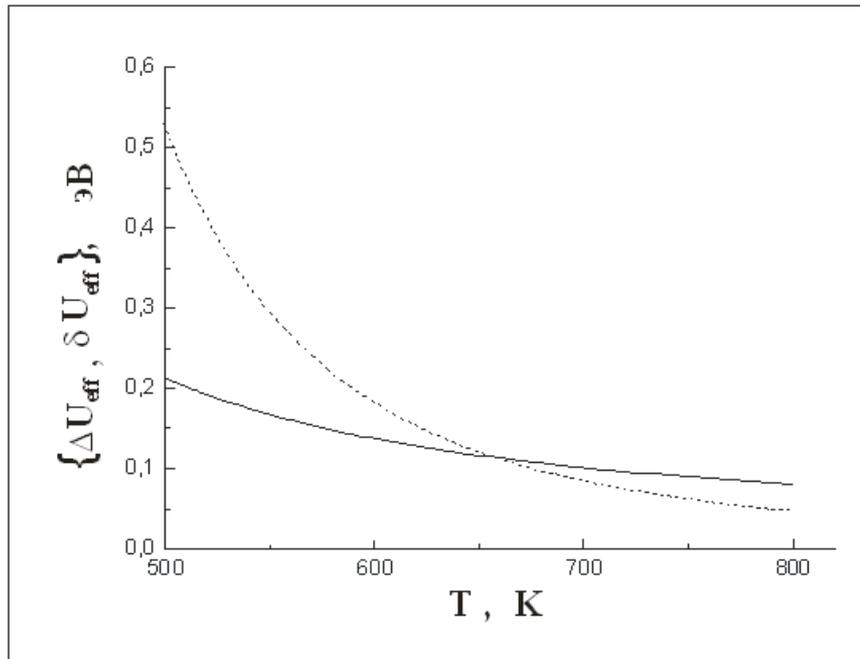


$$\delta U = \frac{1}{D_0 \sqrt{\pi L_0}} \cdot \sqrt{N_D - (1 - \alpha^2) N_A}$$

$$K = N_a / N_D$$

Амплитуда хаотического потенциала на поверхности донорного Si с параметрами в условиях формирования ионных пар донор-акцептор в зависимости от степени компенсации: 1 - на диэлектрической поверхности, 2 - на проводящей поверхности

# Хаотический потенциал в контактах поверхностно-барьерных структур. Естественные флуктуации высоты барьера Шоттки



$$\delta U_{\text{eff}} \approx \frac{e^2}{2\epsilon\ell} \cdot \exp \frac{U_0}{2kT}$$

$$\delta U_{\text{eff}} = \frac{(\Delta U_{\text{eff}})^2}{2kT}$$

Зависимость снижения барьера (сплошная кривая) и величины флуктуаций высоты барьера (пунктирная кривая) в контакте металл-Si (при уровне легирования кремния и значении изгиба зон 0.5 эВ) от температуры формирования равновесного распределения примеси.