

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ РАЗБАВЛЕННЫХ НИТРИДОВ

М.н.с., к.ф.-м.н. Баранов Артем Игоревич
Лаборатория возобновляемых источников энергии
СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова

Содержание доклада



1. Введение
2. Ростовые и экспериментальные методы
3. Результаты, достигнутые в СПбАУ РАН
 - СЭ с (In)GaAs(N), выращенные МПЭ на GaAs
 - СЭ с (In)GaP(AsN), выращенные МПЭ GaP и Si
4. Заключение

Разбавленные нитриды

Разбавленные нитриды GaPN обладают уникальными свойствами по сравнению с GaP:N (Р. R. С. Kent et al. 2001, Егоров А. Ю. и др. 2011).

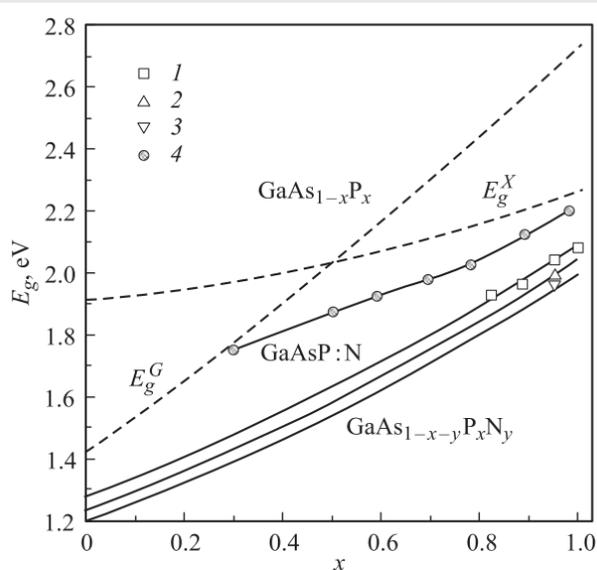


Рис. 1. Зависимости ширины запрещенной зоны E_g твердых растворов от параметра состава x . Расчет: штриховые линии — тройные твердые растворы $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ (E_g^X — в точке X , E_g^G — в точке G зоны Бриллюэна); сплошные линии — четверные твердые растворы $\text{GaAs}_{1-x-y}\text{P}_x\text{N}_y$, сверху вниз $y = 0.006, 0.009, 0.012$. Эксперимент: (1–3) — E_g четверных твердых растворов $\text{GaAs}_{1-x-y}\text{P}_x\text{N}_y$, при $y = 0.006, 0.009, 0.012$ соответственно; 4 — энергия оптических переходов в тройных растворах, легированных азотом, GaAsP:N [11].

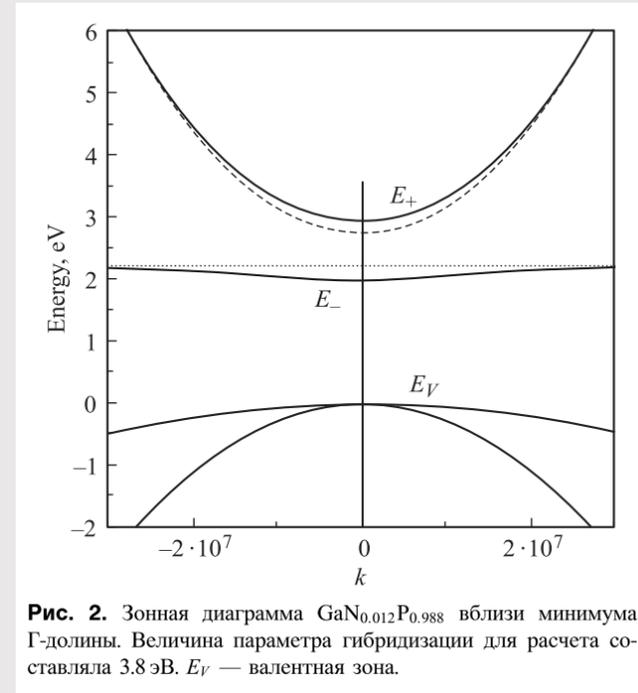
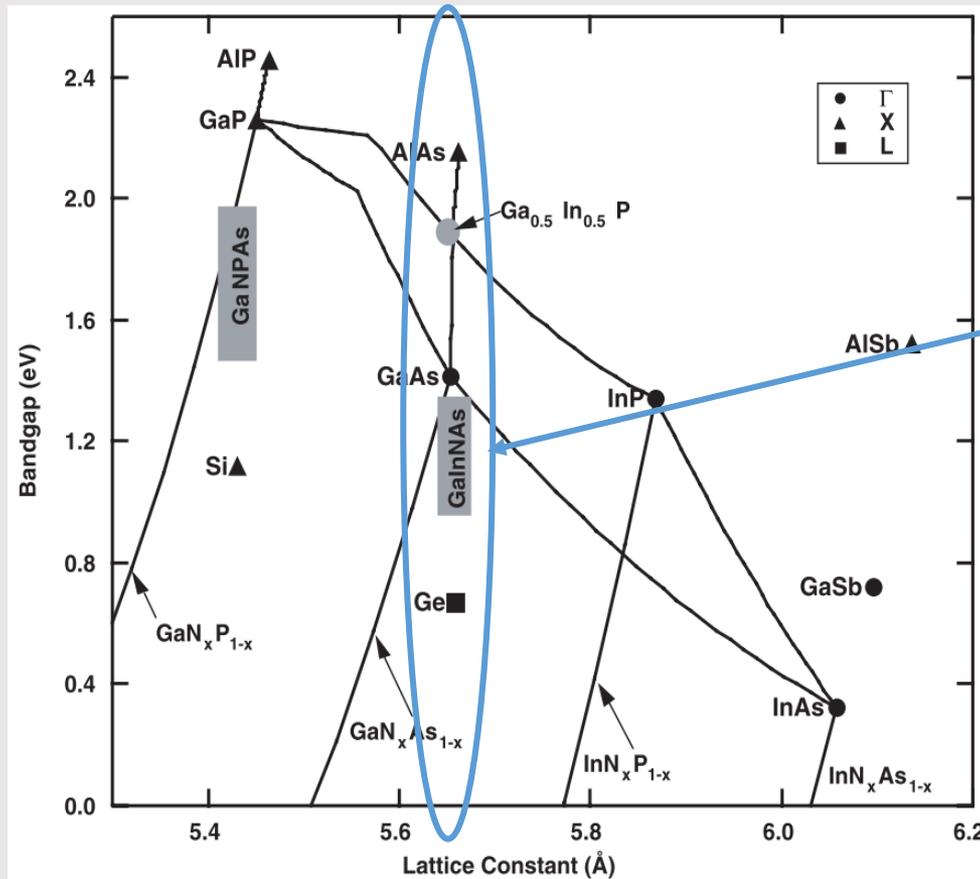


Рис. 2. Зонная диаграмма $\text{GaN}_{0.012}\text{P}_{0.988}$ вблизи минимума Γ -долины. Величина параметра гибридизации для расчета составляла 3.8 эВ. E_V — валентная зона.

$$E_{\pm} = 0.5\{[E_C(k) + E_L] \pm [(E_C(k) - E_L)^2 + 4V_N^2x]^{0.5}\}$$

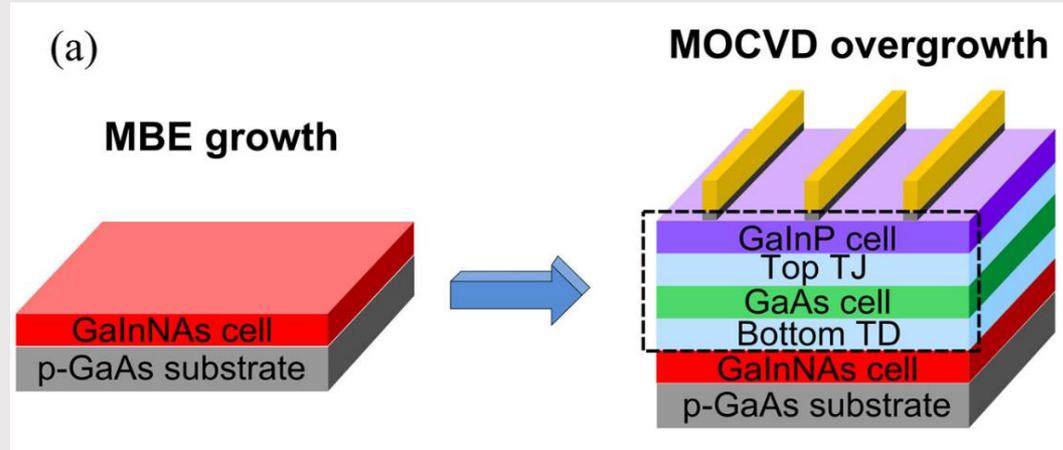
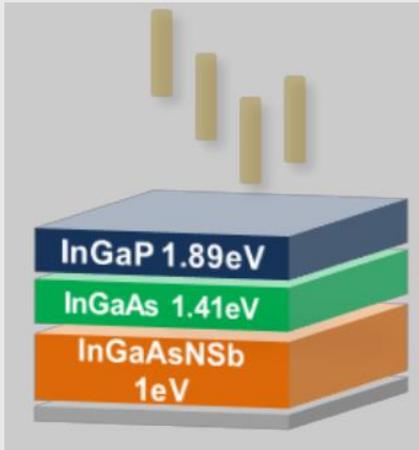
Актуальность

Добавление 1эВ-субэлемента в МСЭ GaInP/GaAs/Ge может увеличить КПД до 52% (Kurtz S.R. et al. 1997 M. Yamaguchi et al. 2008).



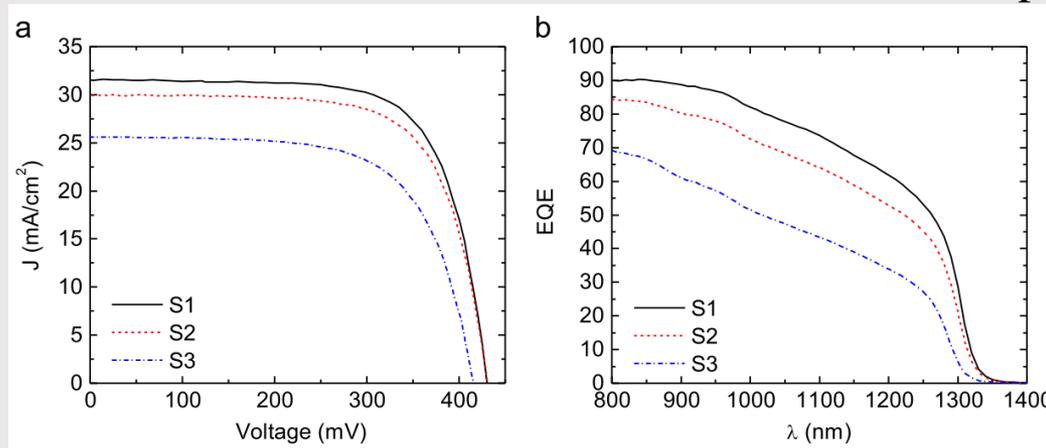
InGaAsN

Солнечные элементы изопериодичные к GaAs/Ge



44% at 925x. Allen J. et al. 2013. (MBE)

31% AM0 / Campesato R. et al. 2017

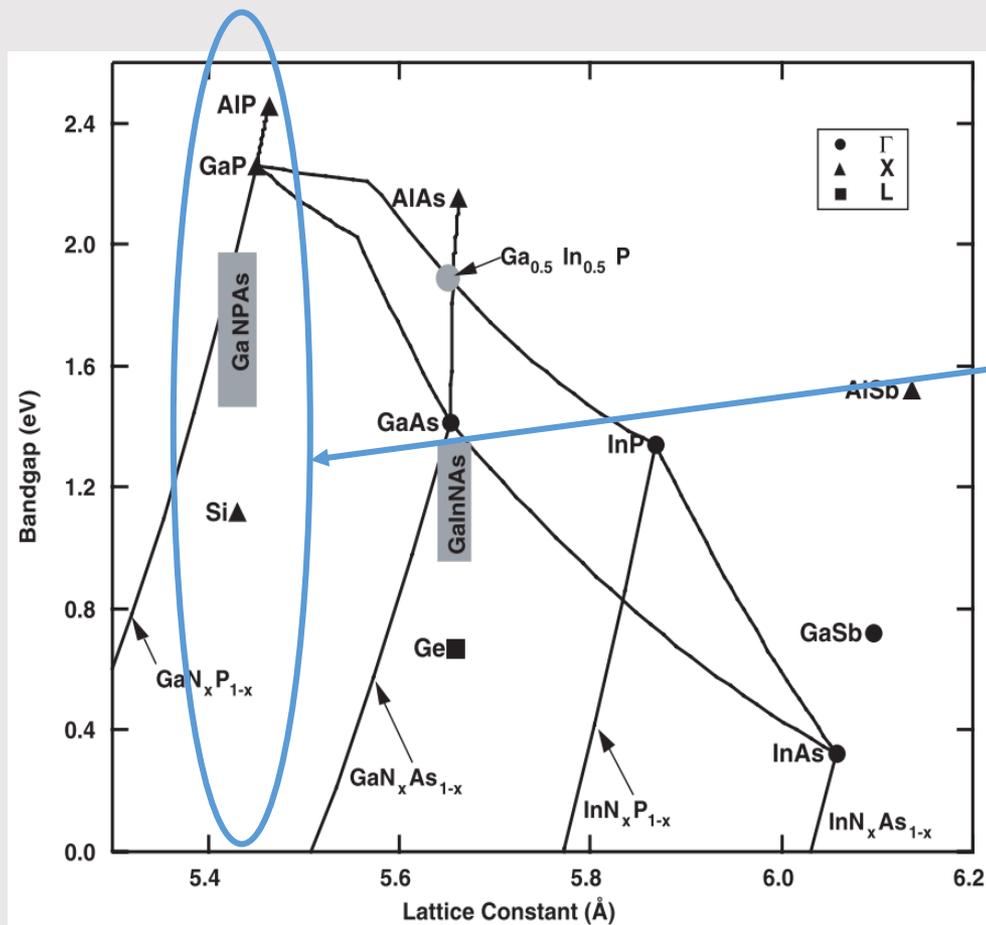


V. Polojärvi et al. 2016



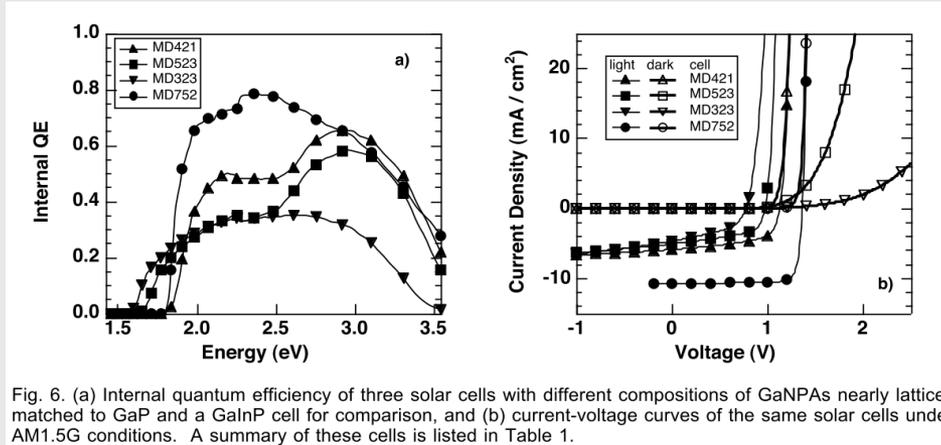
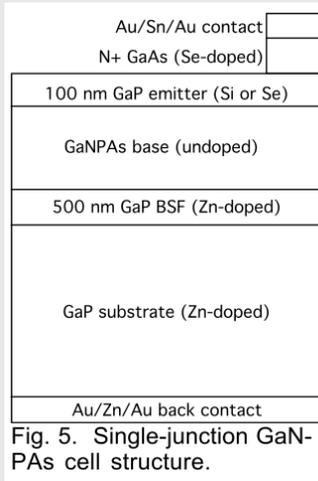
Актуальность

1.1 эВ и 1.7 эВ – оптимальные значения в двухпереходном солнечном элементе (Kurtz S.R. et al. 1997). Доступность кремниевых подложек.



(In)GaP(As)N

Однопереходные солнечные элементы изопериодичные к GaP



sample	base material
MD421	GaN _{0.03} P _{0.83} As _{0.14}
MD523	GaN _{0.05} P _{0.69} As _{0.26}
MD323	GaN _{0.05} P _{0.68} As _{0.27}
MD752	Ga _{0.5} In _{0.5} P

J.F. Geisz et al. 2002 (MOCVD)

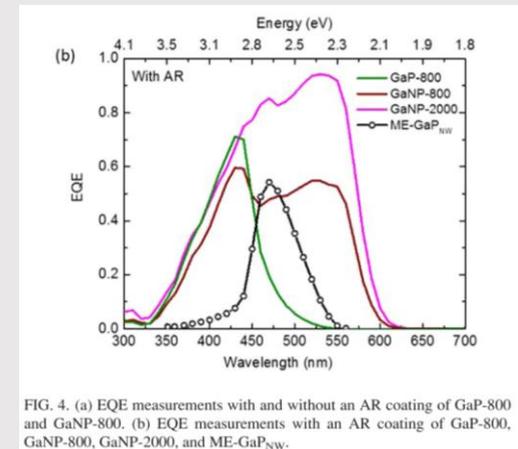
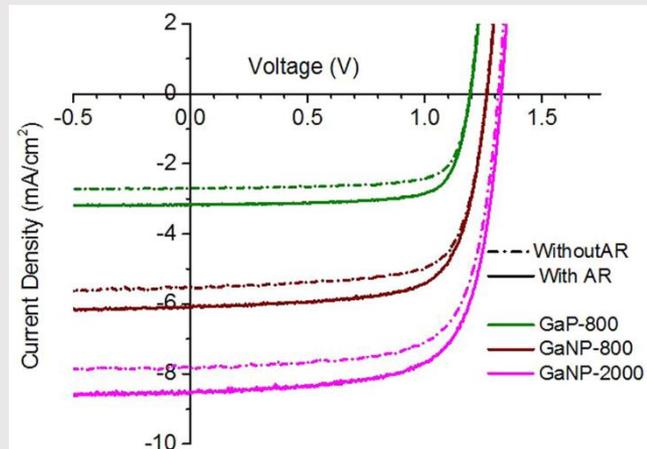
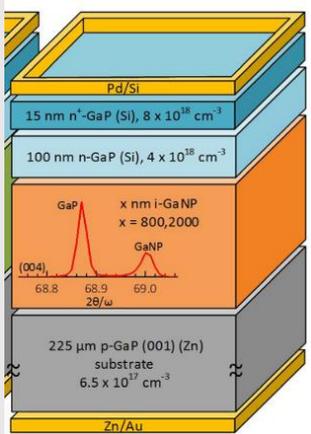


FIG. 4. (a) EQE measurements with and without an AR coating of GaP-800 and GaNP-800. (b) EQE measurements with an AR coating of GaP-800, GaNP-800, GaNP-2000, and ME-GaP_{NW}.

S. Sukritanon et al. 2013 (GS-MBE)

Двухпереходные солнечные элементы изопериодичные к Si

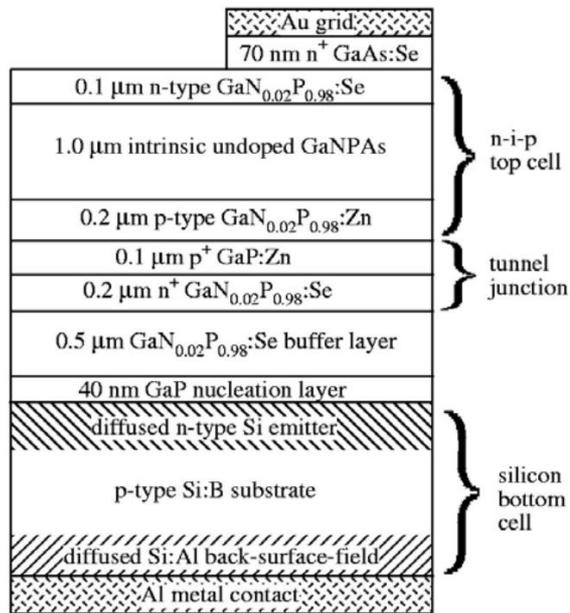


Fig. 1: Schematic of GaNPAs-on-silicon tandem solar cell

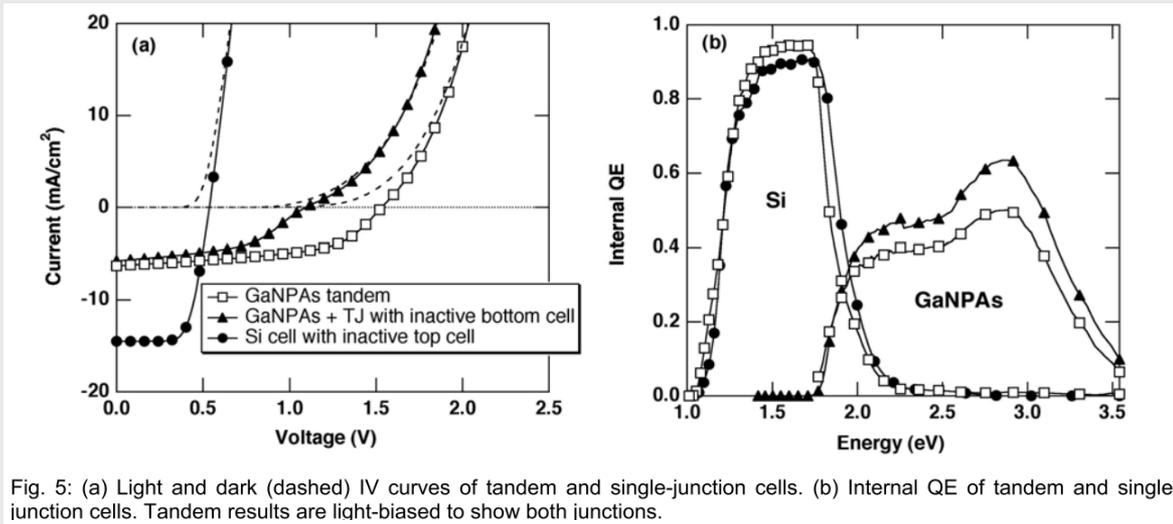


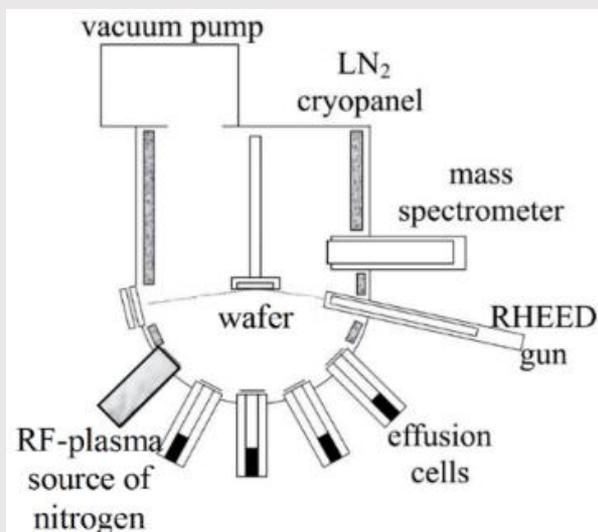
Fig. 5: (a) Light and dark (dashed) IV curves of tandem and single-junction cells. (b) Internal QE of tandem and single-junction cells. Tandem results are light-biased to show both junctions.

J.F. Geisz et al. 2005 (MOCVD)

Проблема: низкие времена жизни в разбавленных нитридах из-за повышенного дефектообразования!

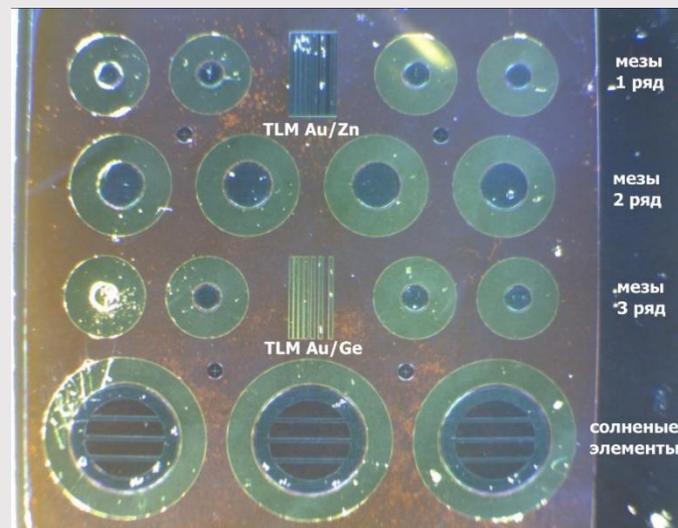
Экспериментальные методы в СПбАУ РАН

Молекулярно-пучковая эпитаксия



Gen III Veeco
с ВЧ источником азота

Постростовая обработка

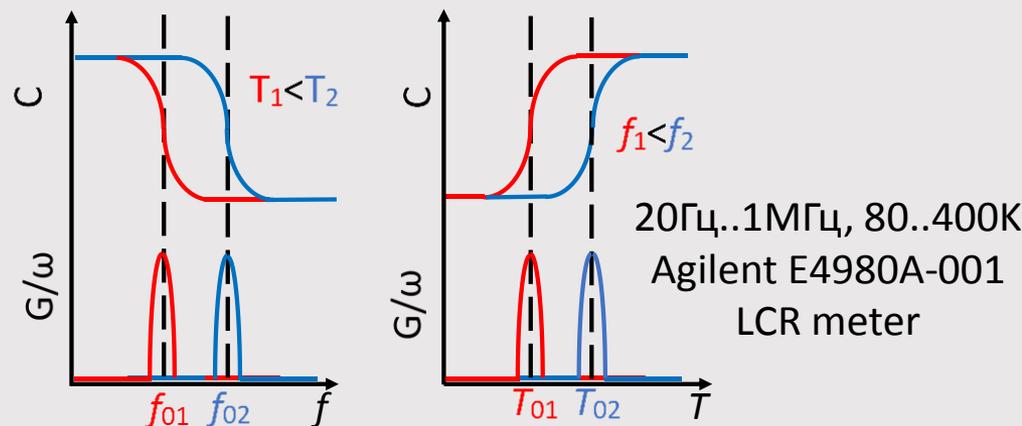


Меза-структуры

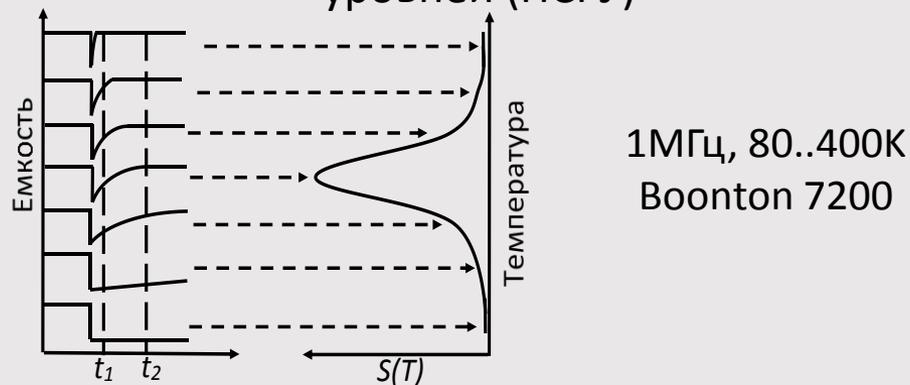
Методы исследований в СПБАУ РАН

1. Фотоэлектрические методы.
2. Емкостные методы.
3. Моделирование.

Спектроскопия полной проводимости (СПП)



Нестационарная спектроскопия глубоких уровней (НСГУ)



Содержание доклада



1. Введение
2. Ростовые и экспериментальные методы
3. Результаты, достигнутые в СПбАУ РАН
 - СЭ с (In)GaAs(N), выращенные МПЭ на GaAs
 - СЭ с (In)GaP(AsN), выращенные МПЭ GaP и Si
4. Заключение и перспективы

Солнечные элементы с InGaAsN слоями

Добавление 1эВ-субэлемента в МСЭ GaInP/GaAs/Ge может увеличить КПД до 52% (М. Yamaguchi et al. 2008).

↳ использование InGaAsN

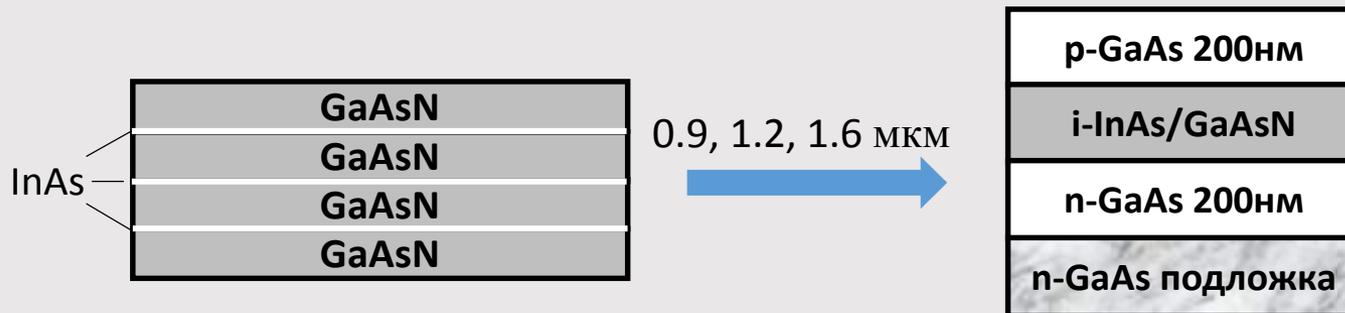
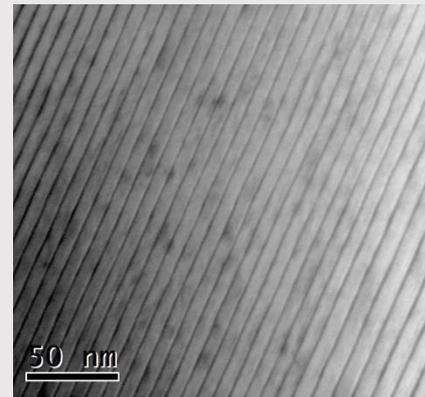
Проблемы: дефекты и фоновое легирование (10^{16}см^{-3})

Polojarvi et al. 2016, Johnston et al. 2003

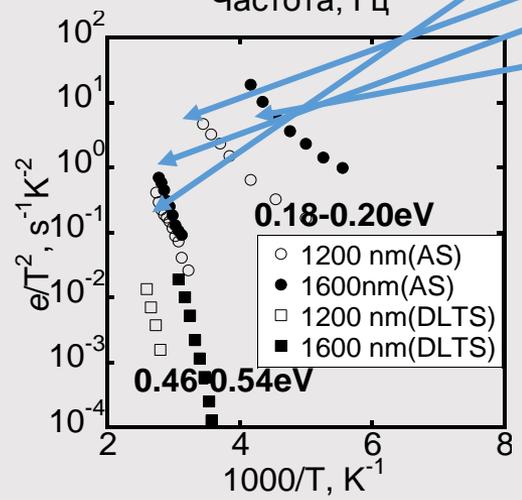
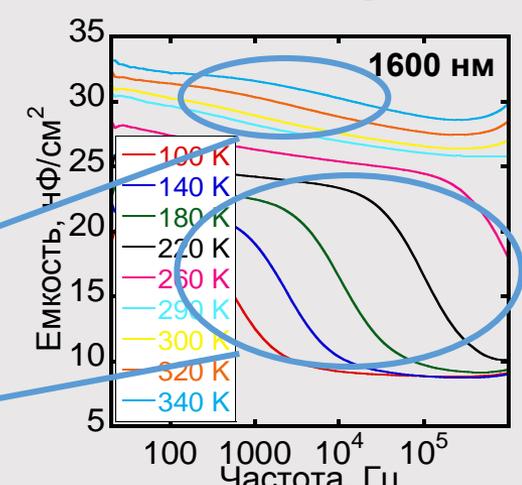
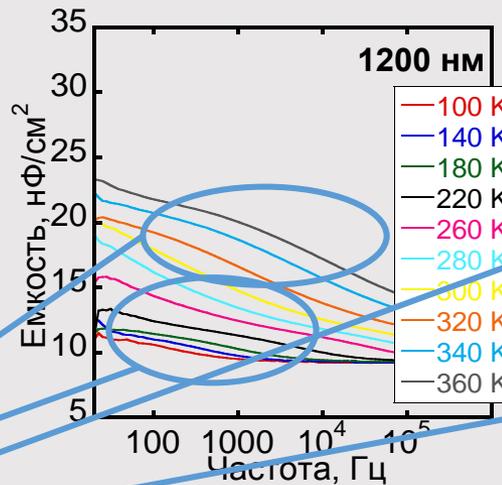
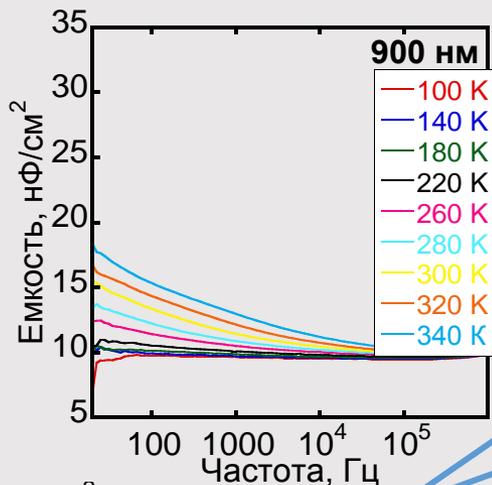
Использование Sb *Miyashita et al. 2017*

Рост InGaAsN в виде субмонослойного цифрового раствора

→ Сверхрешетка InAs(0.2-0.5нм)/GaAsN(7-12нм).



Спектроскопия полной проводимости



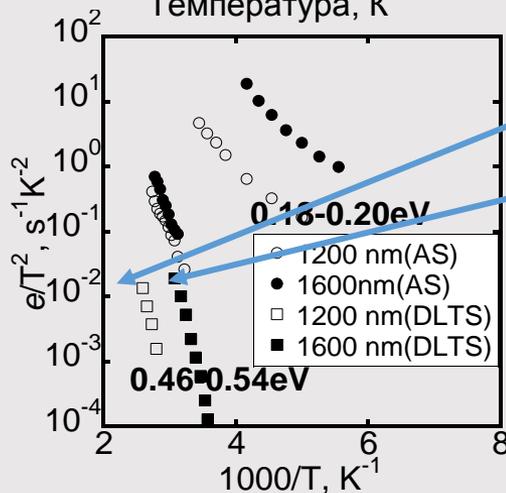
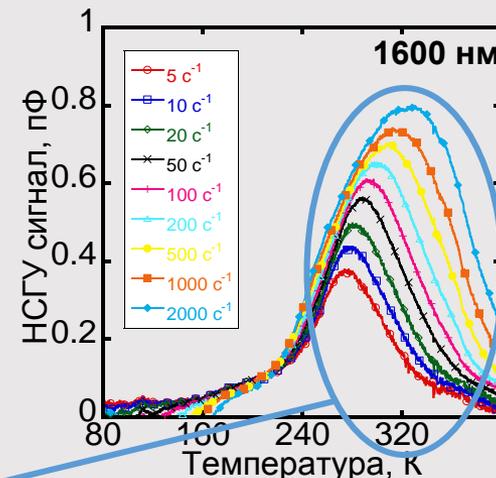
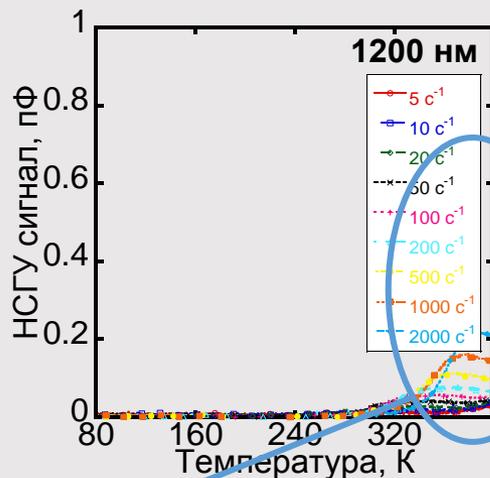
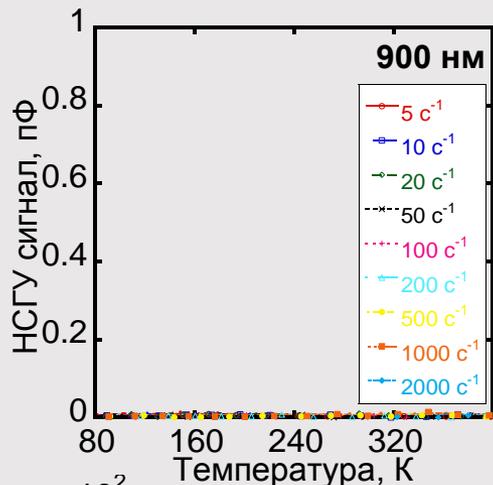
0.9 мкм: **бездефектный** с низким фоновым легированием (10^{15}см^{-3})

1.2 мкм: **дефекты 0.20 эВ** ($5.0 \times 10^{14} \text{см}^{-3}$) и **0.46 эВ** ($8.4 \times 10^{14} \text{см}^{-3}$)

1.6 мкм: **дефекты 0.18 эВ** ($3.5 \times 10^{15} \text{см}^{-3}$) и **0.54 эВ** ($1.0 \times 10^{15} \text{см}^{-3}$)

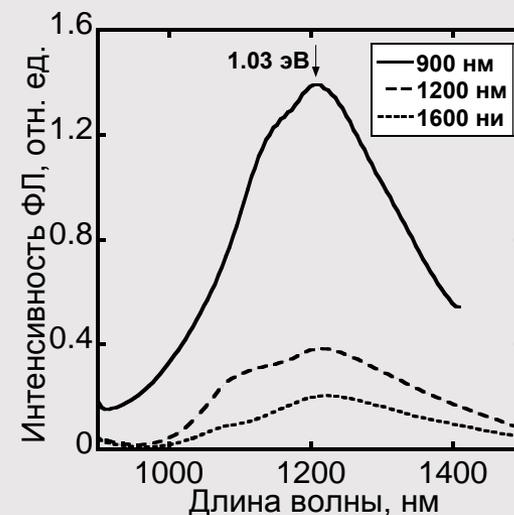
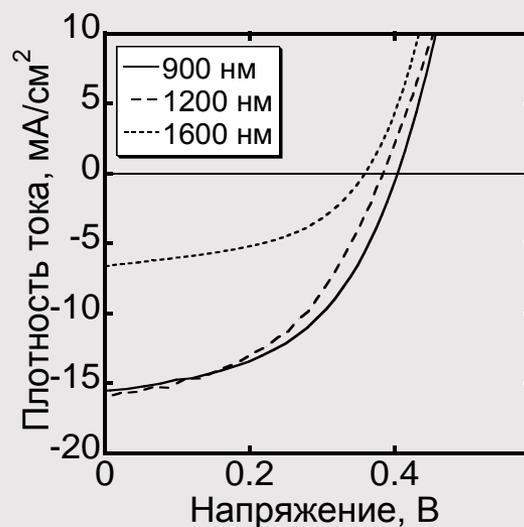
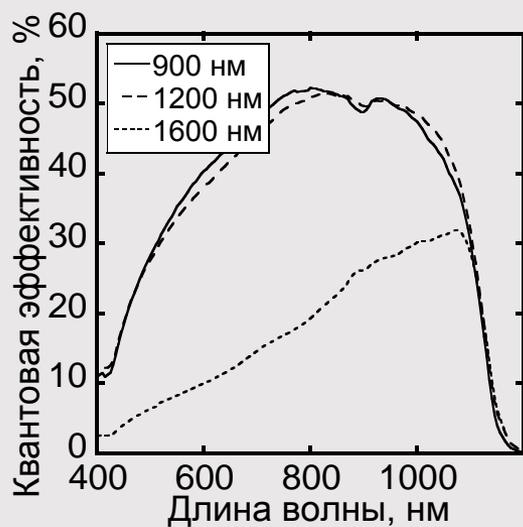
Увеличение концентрации дефектов с увеличением толщины!

Нестационарная спектроскопия глубоких уровней



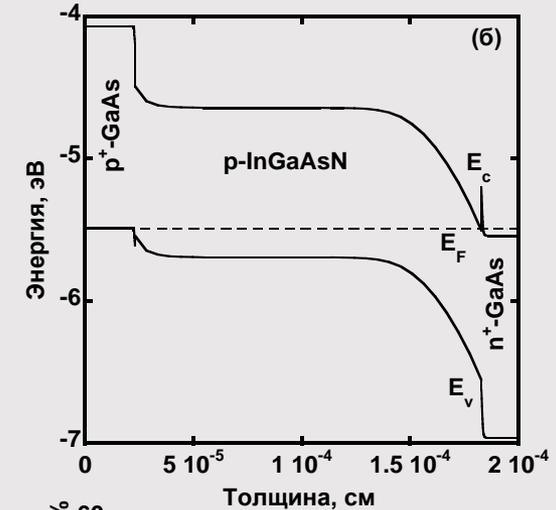
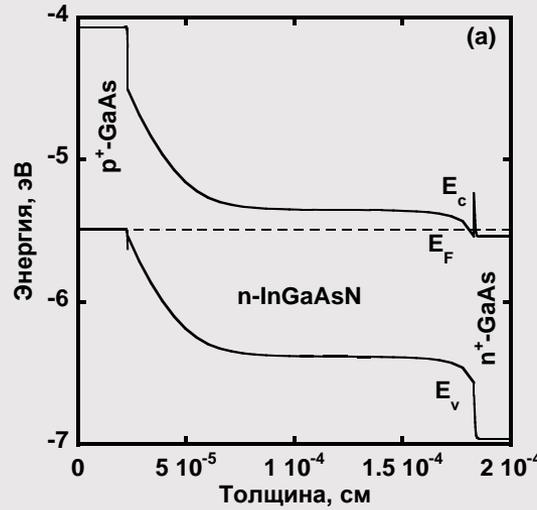
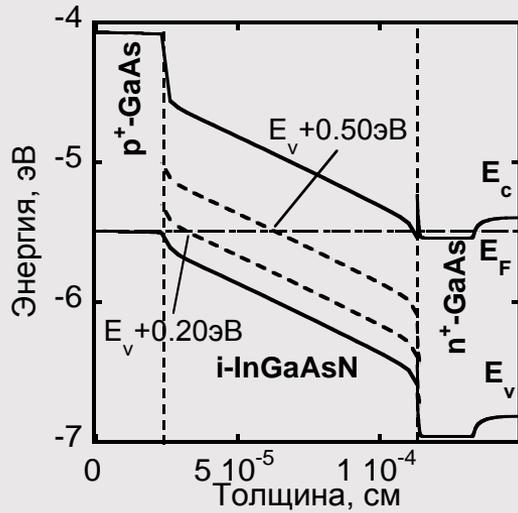
Увеличение концентрации дефектов с увеличением толщины!

Фотоэлектрические свойства СЭ с InAs/GaAsN



Ухудшение свойств с увеличением
толщины!

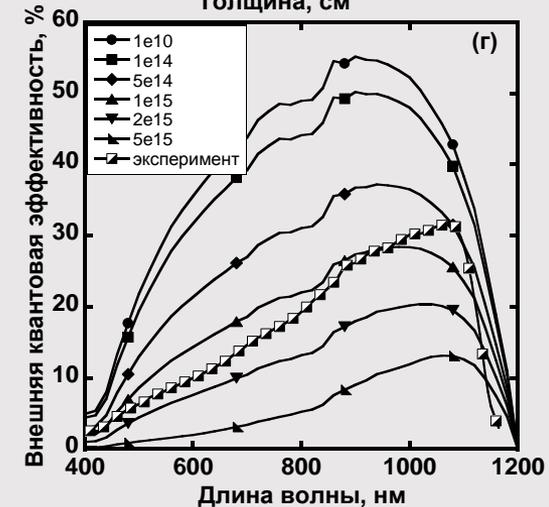
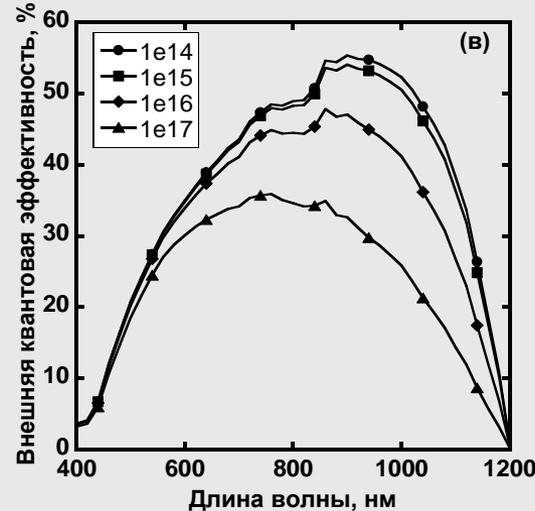
Влияние толщины InAs/GaAsN на фотоэлектрические свойства



0.20 эВ – источник акцепторного легирования!

0.50 эВ – центры безызлучательной рекомбинации!

Влияние дефектов объясняет поведение образцов!



Содержание доклада



1. Введение
2. Ростовые и экспериментальные методы
3. Результаты, достигнутые в СПбАУ РАН
 - СЭ с (In)GaAs(N), выращенные МПЭ на GaAs
 - СЭ с (In)GaP(AsN), выращенные МПЭ GaP и Si
4. Заключение и перспективы

Солнечные элементы с (In)GaP(As)N слоями

$\text{GaP}_{0.98}\text{N}_{0.02}$: **прямозонный, изопериодичный к Si дефектный, $E_g=2.06$ эВ**

↳ Добавка As и (или) In: **подавление дефектообразования, E_g в 1.5-2.1 эВ**

Мало информации о свойствах (In)GaPN(As) с $N>1\%$

GaP:N - Tell et al. 1978, Кольцов и др. 1990, Kaminski et al. 1991

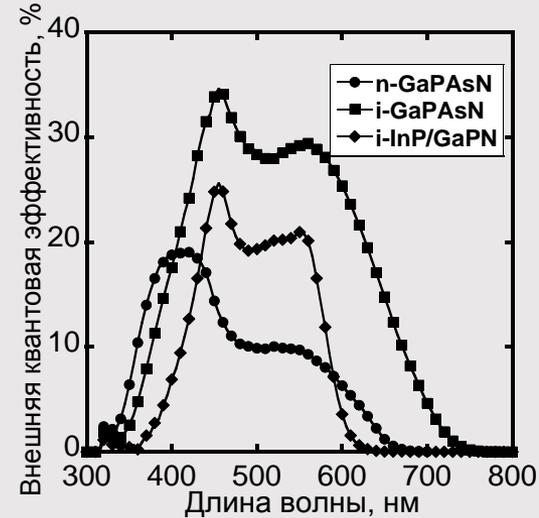
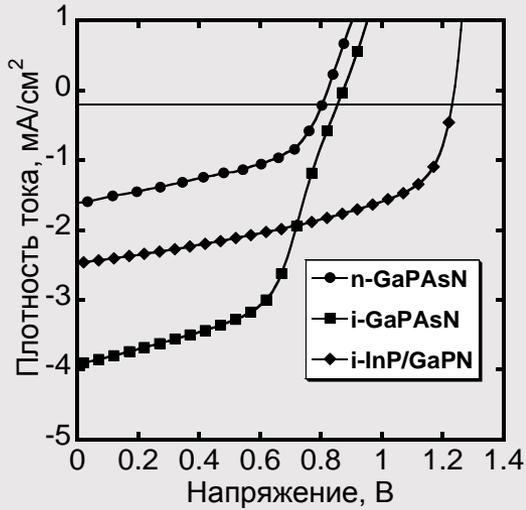
InGaPNAs - ОДМР (Buyanova et al. 2002-2015)

p-GaP
(In)GaP(As)N
n-GaP
n-GaP подложка

Материал	Легирование	Толщина, нм	E_g , эВ
GaPAsN	n ($1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)	1000	1.9
GaPAsN	i	300	1.7
InP/GaPN	i	350	2.04

Последний образец на основе цифрового раствора InP(0.3 нм)/GaPN(10 нм).

Фотоэлектрические свойства однопереходных СЭ с (In)GaP(As)N

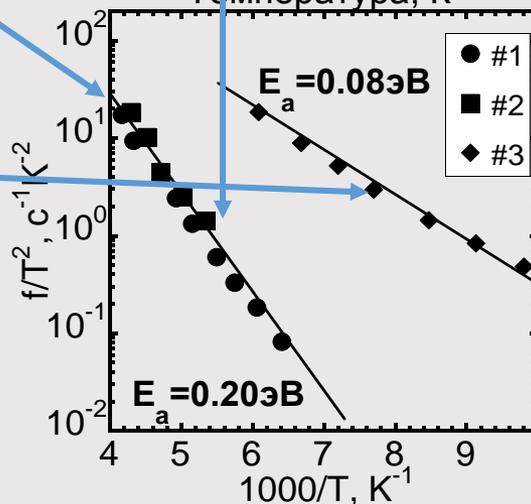
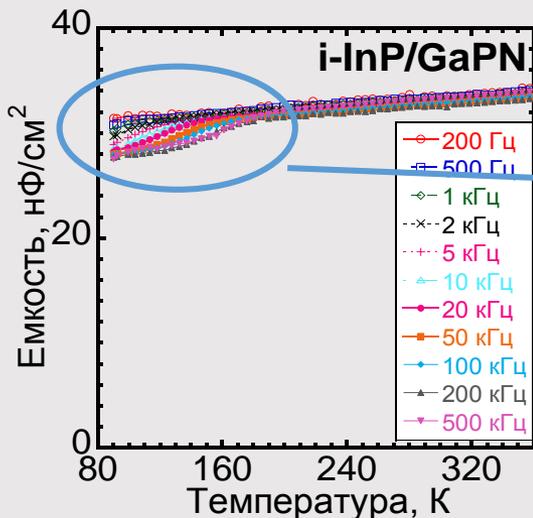
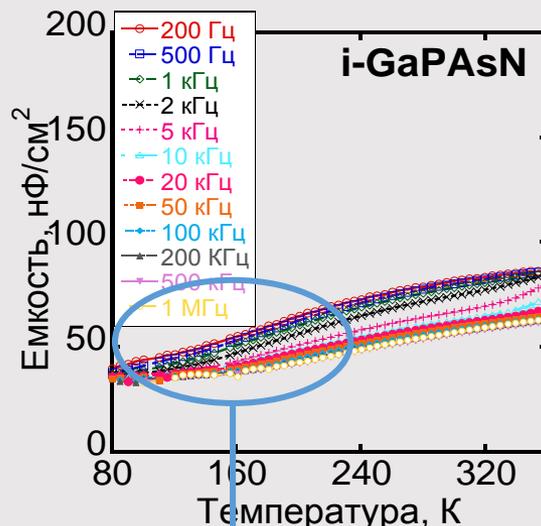
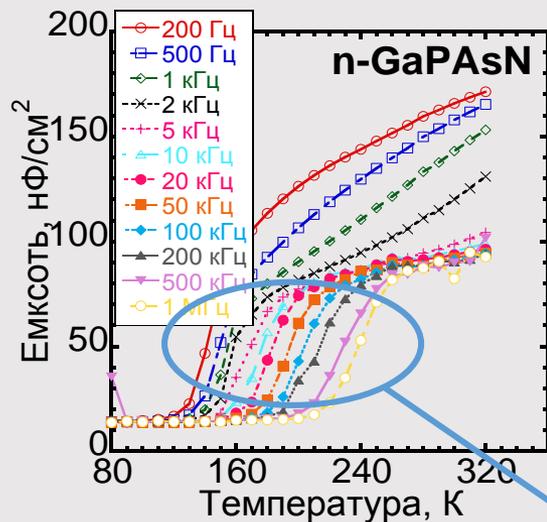


n-GaPAsN: низкий J_{sc} , низкое V_{oc} , низкая QE.

i-GaPAsN: большой J_{sc} , большее V_{oc} , большее QE.

Дефекты могут приводить к худшим свойствам СЭ со
слоем InP/GaPN!

Спектроскопия полной проводимости

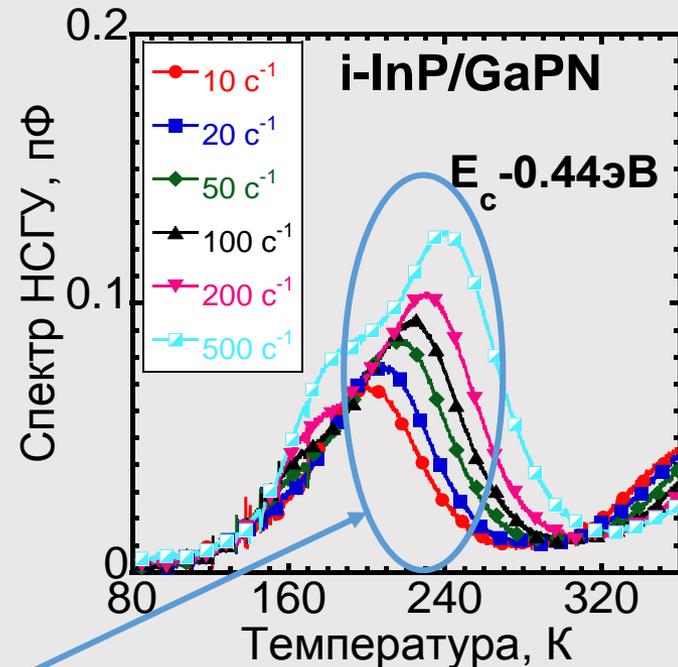
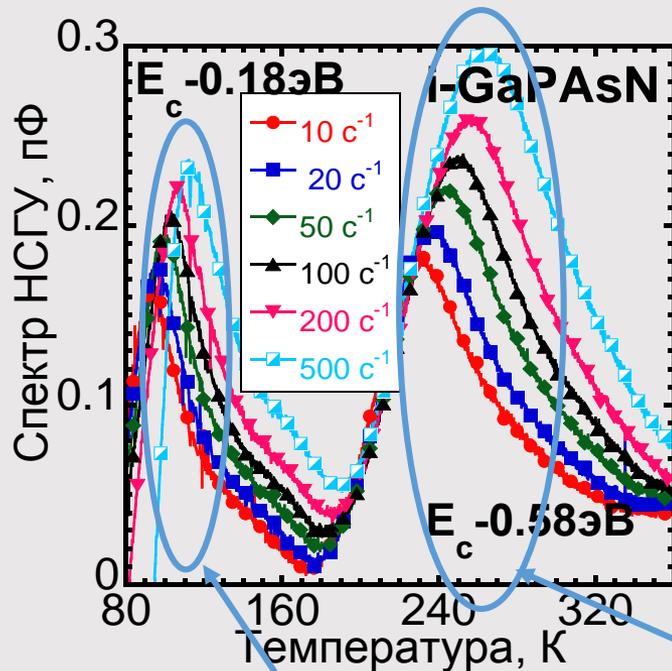


0.20 эВ в GaPAsN

0.08 эВ в InP/GaPN

СПП обнаружила мелкие уровни, связанные со встраиванием кремния в слой!

НСГУ без инъекции неосновных носителей заряда

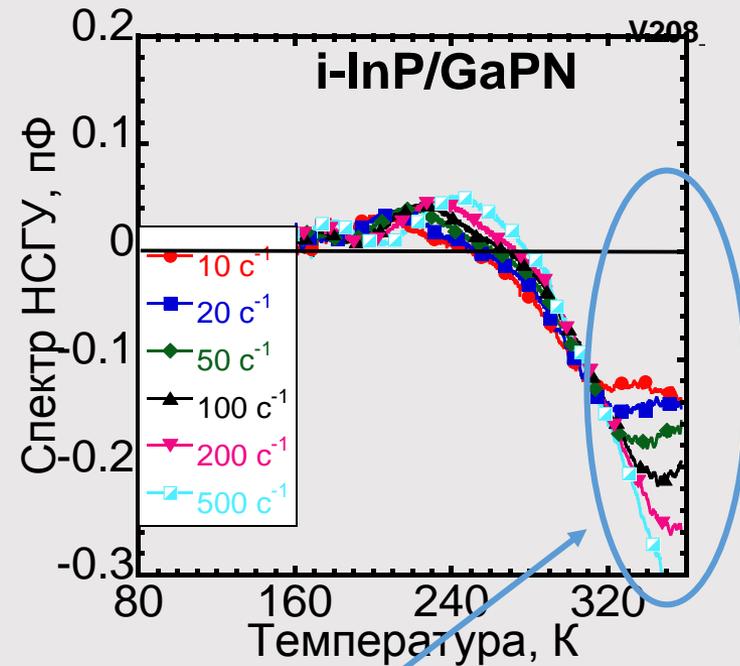
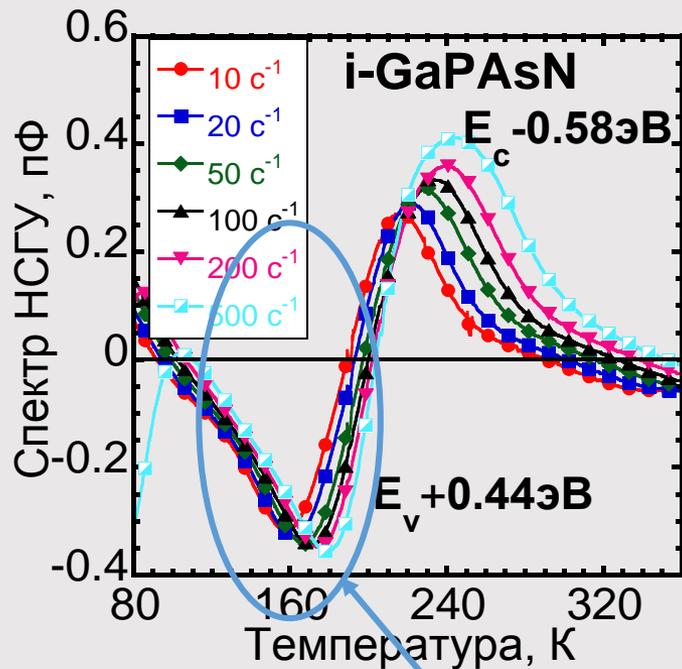


i-GaPAsN: 0.18 эВ (СПП) и глубокий 0.58 эВ

i-InP/GaPN: 0.44 эВ

НСГУ обнаружила глубокие ловушки для электронов,
связанные со встраиванием азота, в образцах!

НСГУ с инжекцией неосновных носителей заряда



i-GaPAsN: $E_v + 0.44$ эВ

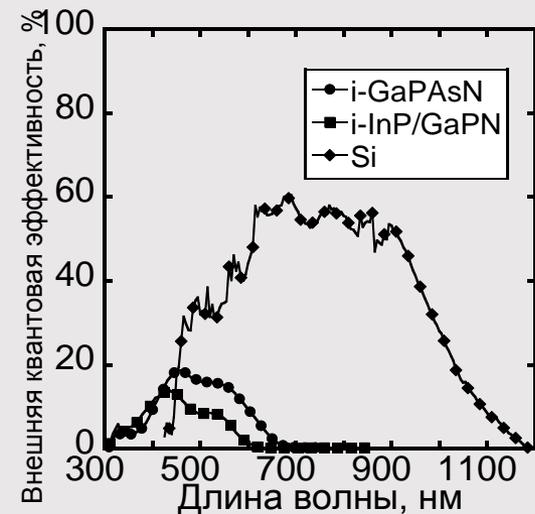
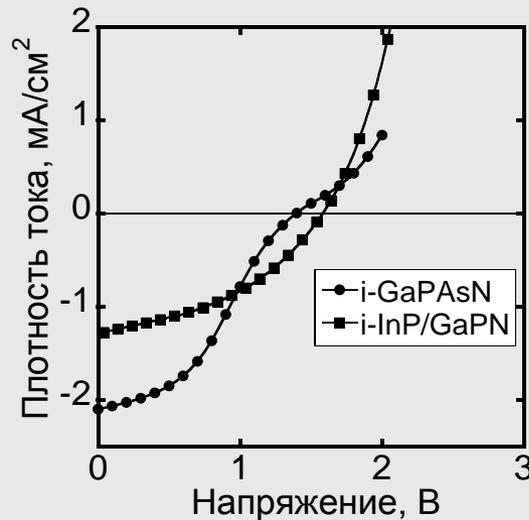
i-InP/GaPN: Глубокий дефект, близкий к середине E_g !

Фотоэлектрические свойства двухпереходных СЭ с (In)GaP(As)N

Только 1 двухпереходный СЭ с GaP(N) выращен на Si (ГФЭ, Geisz et al. 2005)

Первые МСЭ на p-Si с верхним p-i-n субэлементом!

n-GaP
(In)GaP(As)N 200 нм
p-GaP
Туннельный переход
n-GaP
p-Si подложка



Обнаруженные дефекты приводят к худшим свойствам СЭ
со слоем InP/GaPN!

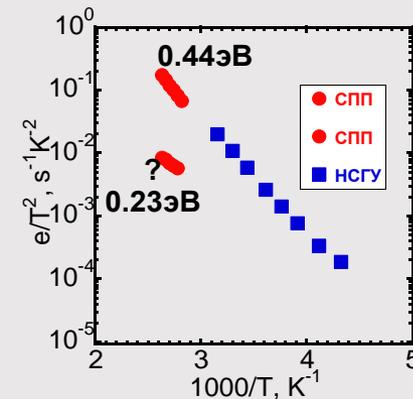
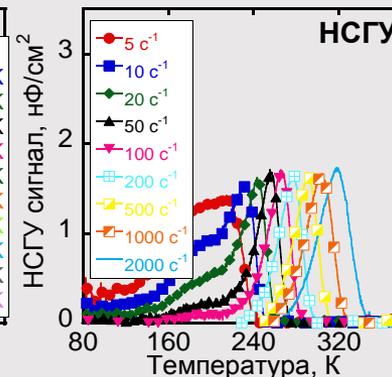
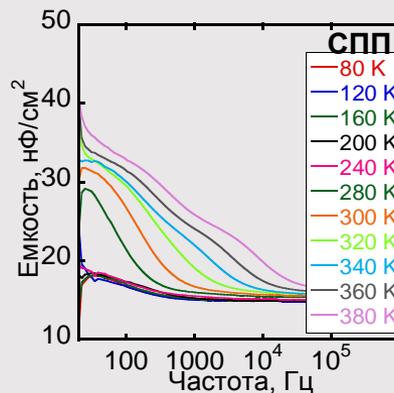
Дефекты в двухпереходных СЭ



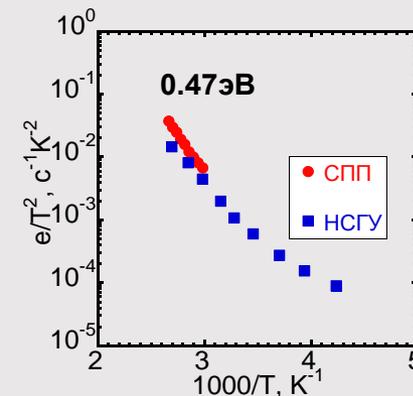
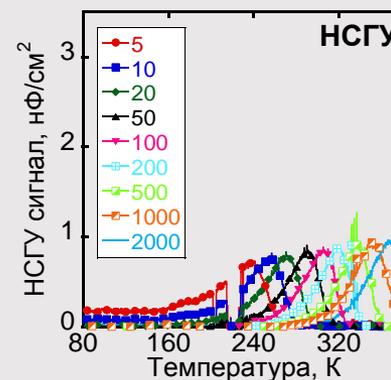
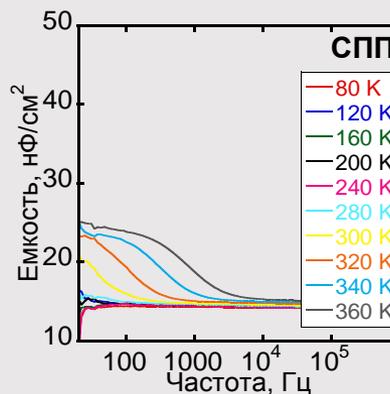
Geeps
Généraliste et électronique de Paris

n-GaP
(In)GaP(As)N 200 нм
p-GaP
Туннельный переход
n-GaP
p-Si подложка

InP/GaPN



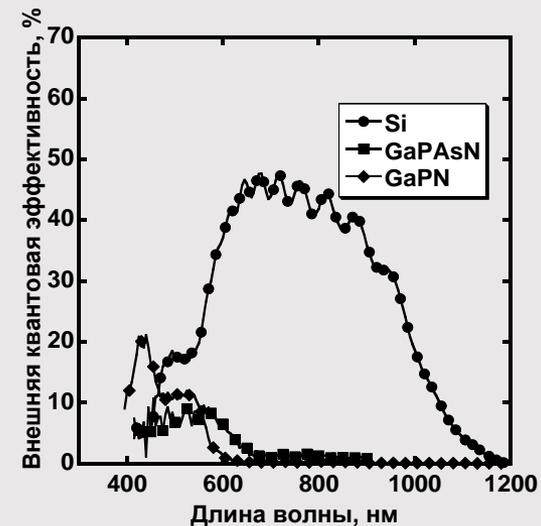
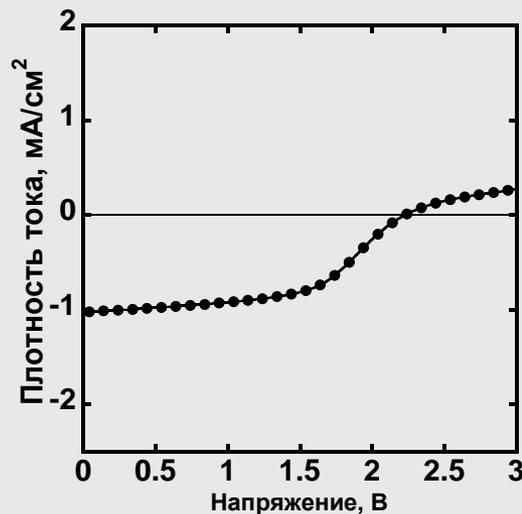
GaPAsN



Похожие дефекты с большей концентрацией в InP/GaPN.

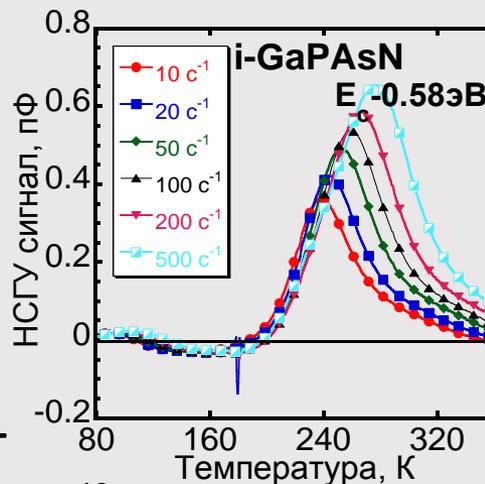
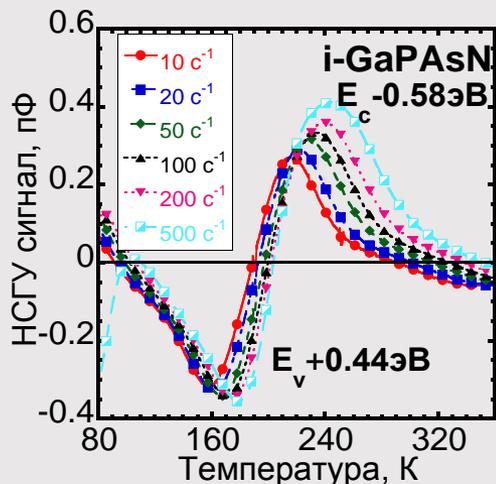
Фотоэлектрические свойства трехпереходного СЭ с (In)GaP(As)N

n-GaP 100 нм $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
n-GaPN 150 нм $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$
i-GaPN 150 нм
p-GaPN 150 нм $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$
Туннельный переход
n-GaPN 150 нм $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$
i-GaPAsN 200 нм
p-GaPN 300 нм $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$
Туннельный переход
n-GaP 100 нм $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
p-Si подложка

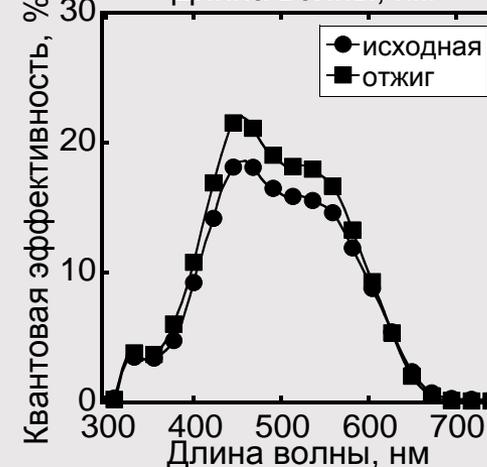
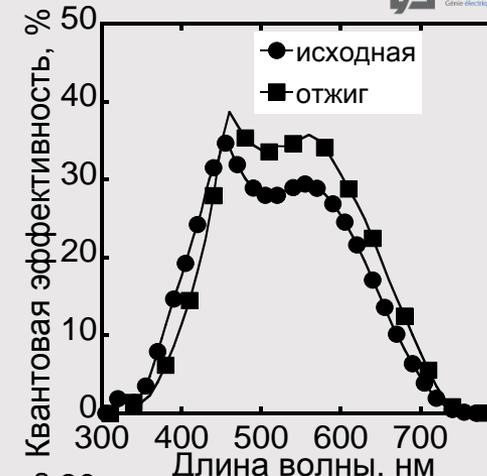
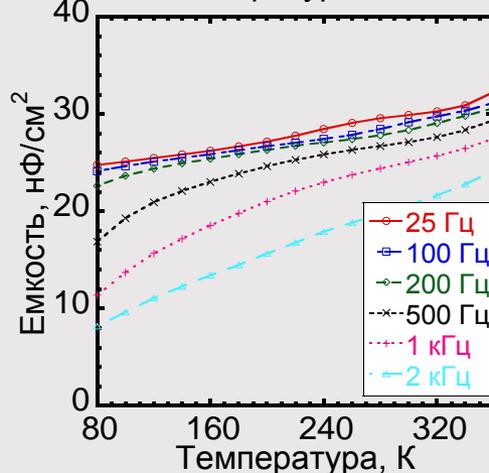
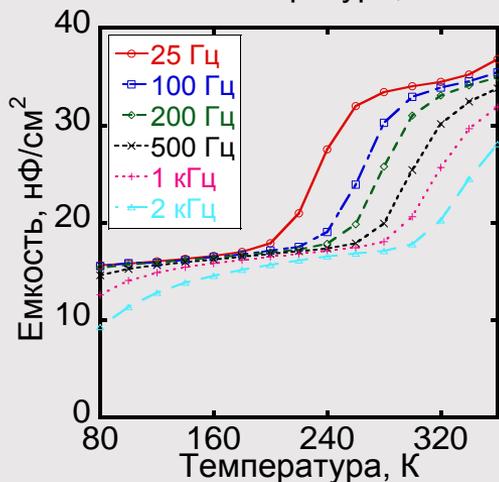


Первый трехпереходный СЭ, выращенный МПЭ!

Влияние отжига на свойства GaPAsN



ОТЖИГ



Отжиг ведет к уменьшению концентрации дефектов, связанных со встраиванием азота, и увеличению КЭ!

Заключение



1. Метод цифровых растворов подходит для роста разбавленных нитридов InAs/GaAsN на подложках GaAs.
2. Добавление мышьяка в раствор GaPN позволяет снизить дефектообразование в GaPNAs по сравнению с цифровым раствором InP/GaPN, а постростовой отжиг позволяет еще улучшить его свойства.
3. Качество разбавленных нитридов на основе GaP еще очень низкое для использования в фотовольтаике и нуждается в дальнейшей доработке.

Спасибо за внимание!

«ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ РАЗБАВЛЕННЫХ НИТРИДОВ»

Артем Баранов готов ответить на ваши вопросы.

Spbau.ru baranov_art@spbau.ru