

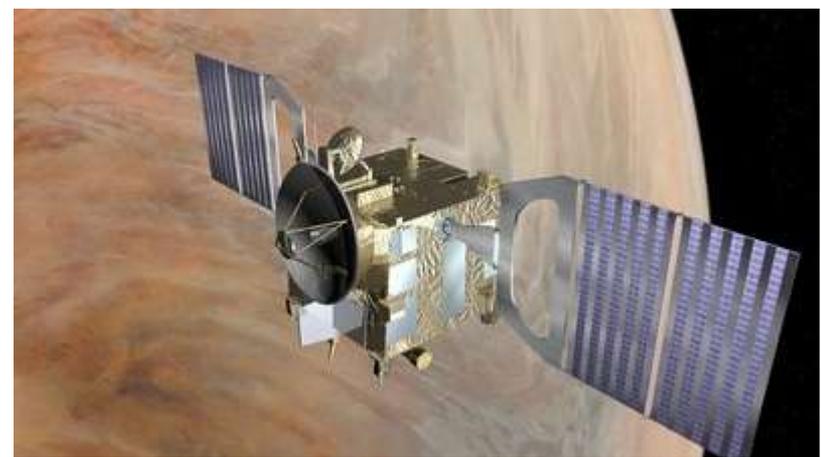


**ФИЗИКА
МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ
ПРИБОРОВ**

III-V

3.

Устройства на A^3B^5
(общие сведения).



Доноры и акцепторы для GaAs

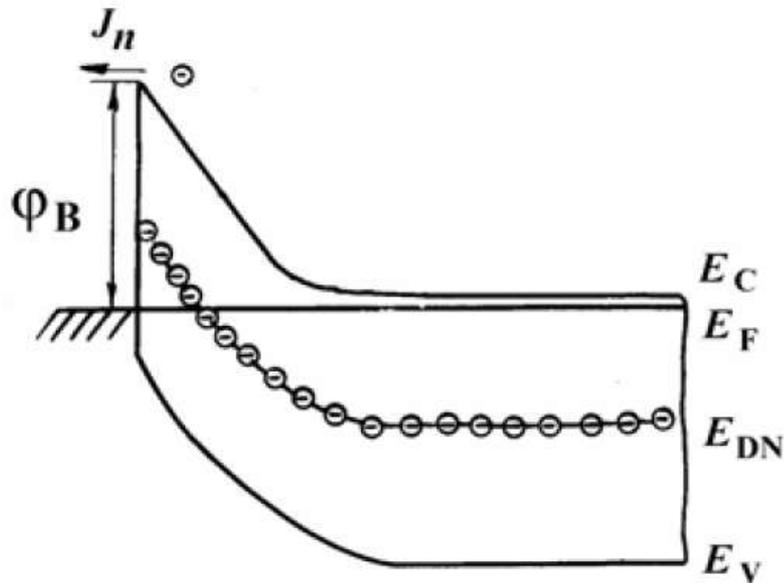
Нелегированные эпитаксиально выращенные слои GaAs, обладают **p-типом** проводимости с концентрацией свободных дырок около 10^{14} см^{-3} . «Фоновой» примесью при этом является углерод (акцептор) с энергией связи 26 мэВ.

Акцепторы	Доноры
на месте Ga – Be, Mg, Zn, Cd на месте As – C, Si, Sn	на месте Ga – Si, Ge, Sn на месте As – S, Se, Te

Как правило, в качестве примеси p-типа в GaAs и AlGaAs используется **Be**, создающий мелкий уровень (~ 28 мэВ) вблизи валентной зоны. В качестве альтернативной **Be** примеси служит **Mg**: он менее токсичен, и используется при более низких температурах (< 500 °C). Магний может быть использован как примесь p - типа вплоть до концентраций 10^{18} см^{-3} . Выше этих концентраций морфология поверхности сильно деградирует из-за образования комплексов Mg-As.

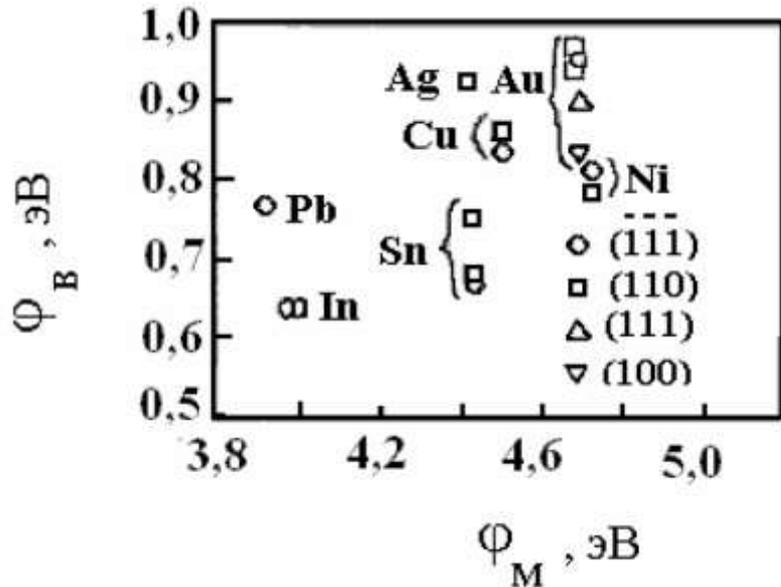
Zn и **Cd**, которые нашли широкое применение при легировании в жидкофазной или парофазной эпитаксии, сложно использовать в МВЕ. В качестве донорной примеси в GaAs широко используется Sn.

Базовая структура – диод Шоттки



Зонная структура
выпрямляющего контакта
металл–полупроводник:

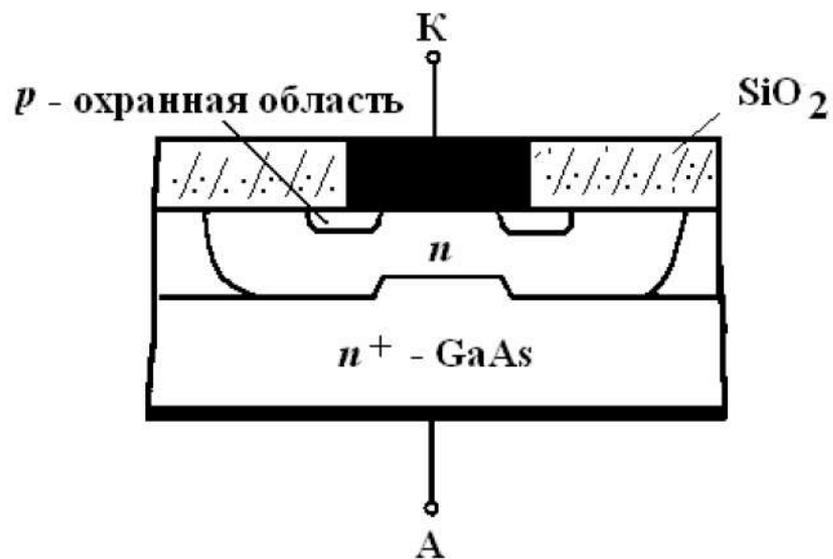
- J_n – ток основных носителей заряда;
- ϕ_B – высота потенциального барьера металл–полупроводник;
- E_C – энергия дна зоны проводимости;
- E_F – энергия уровня Ферми;
- E_{DN} – энергия глубоких уровней;
- E_V – энергия потолка валентной зоны



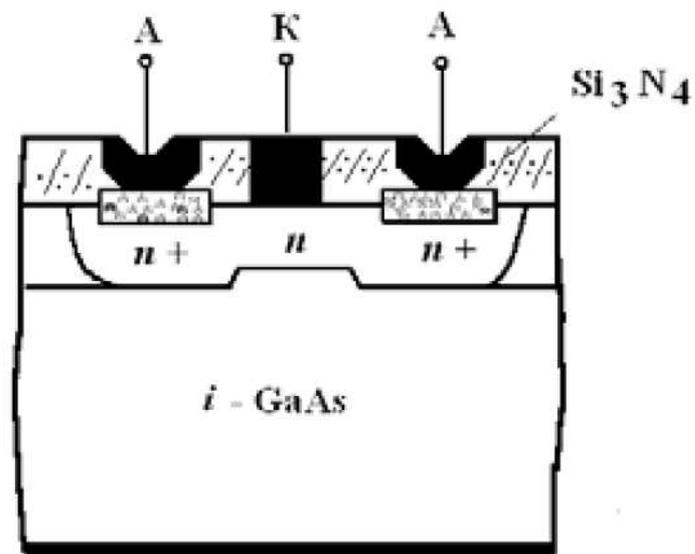
$$J_n = RT^2 S e^{-\frac{\phi_B}{kT}} \cdot \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right)$$

- $R \sim 8$ (A/cm²·K²) – постоянная Ричардсона для GaAs;
- S – площадь контакта, см²;
- U – напряжение на переходе.

Базовая структура – диод Шоттки

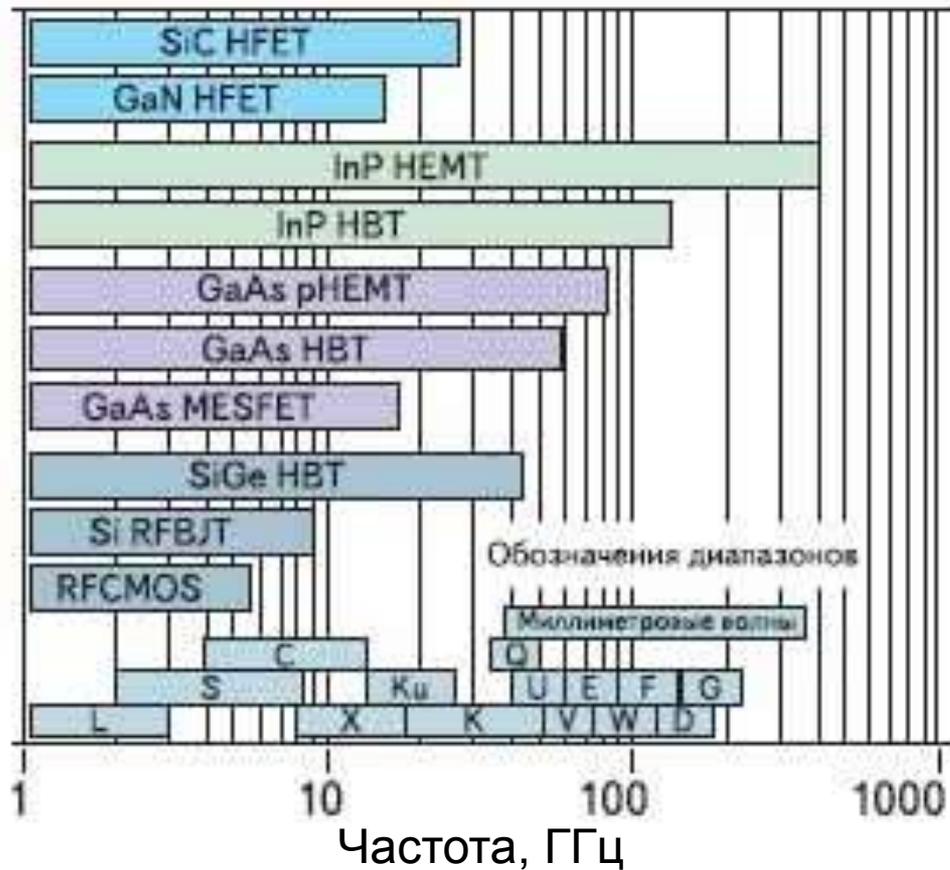


дискретный элемент



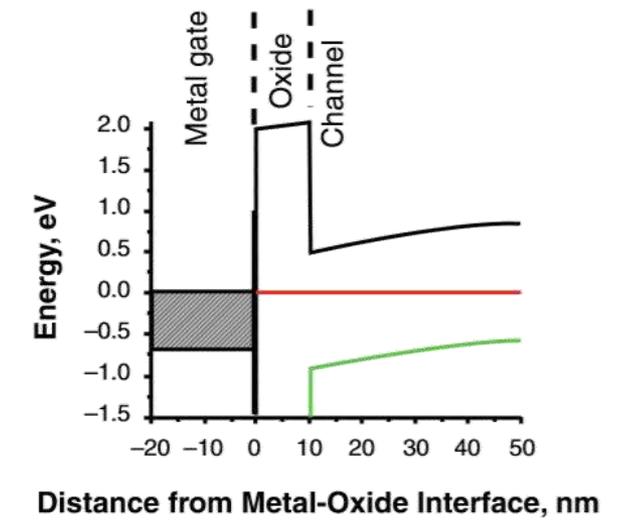
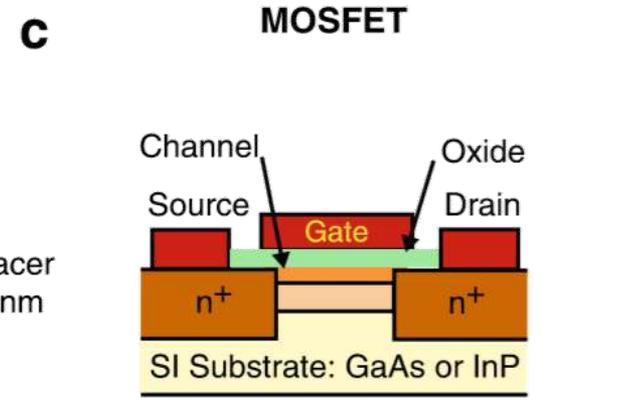
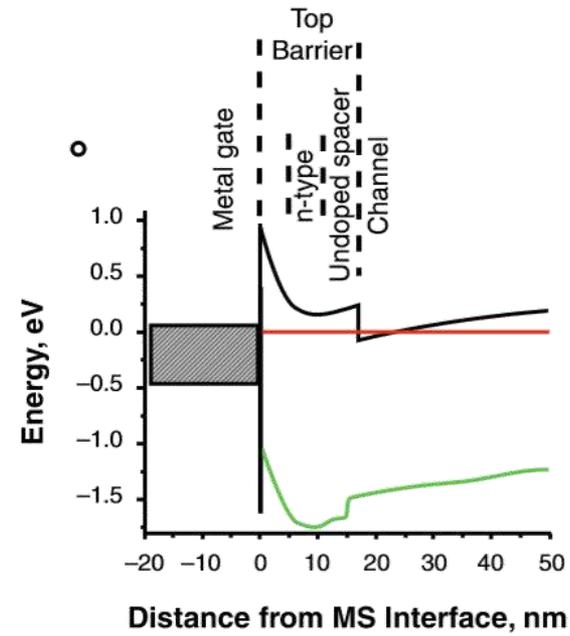
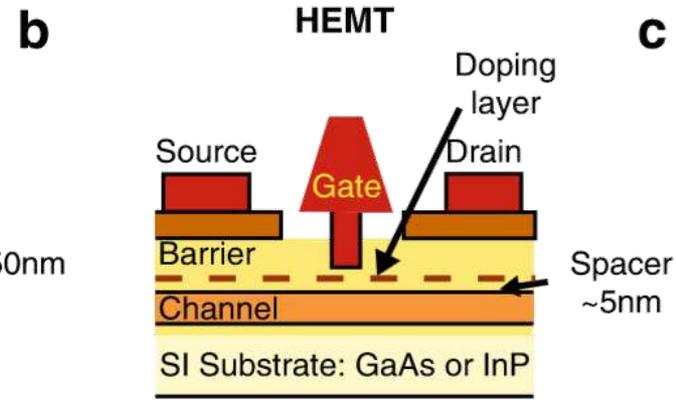
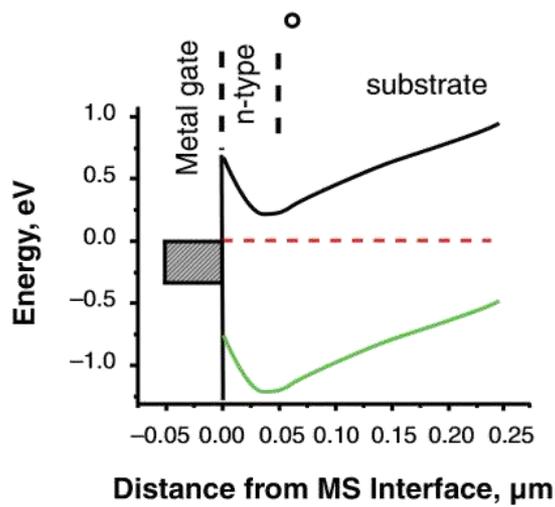
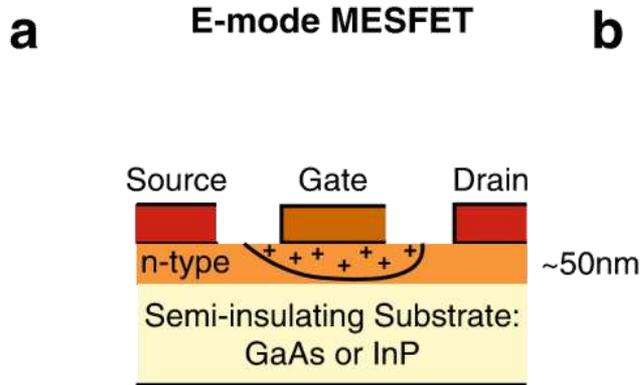
интегральное исполнение

Предназначение



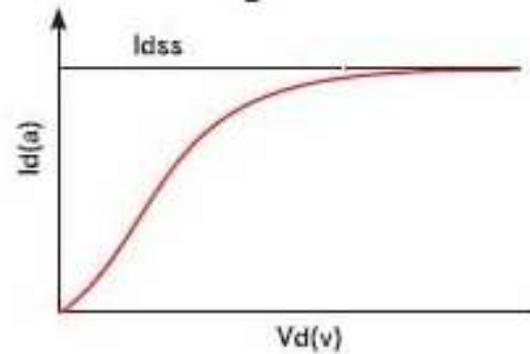
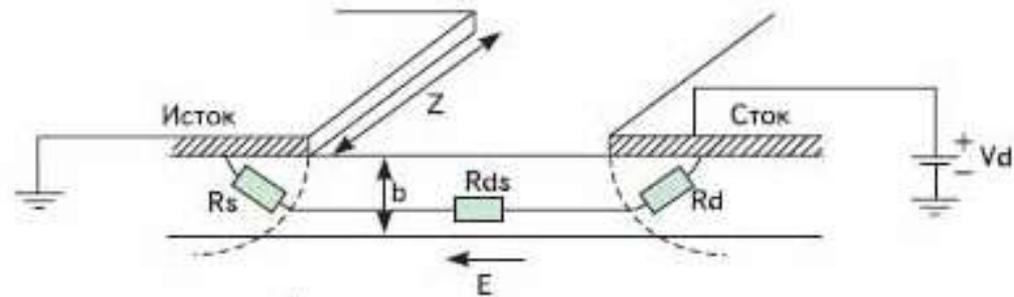
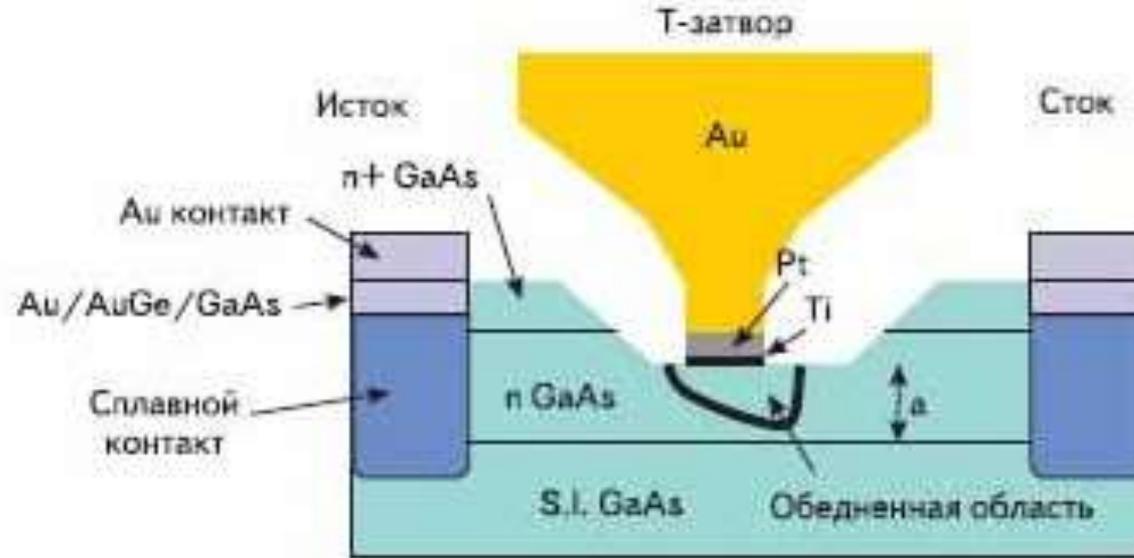
HFET – полевой гетеротранзистор,
HEMT – транзистор с высокой подвижностью электронов
pHEMT – псевдоморфный транзистор
HBT – биполярный гетеротранзистор
MESFET – полевой транзистор с барьером Шоттки
VJT – биполярный транзистор
CMOS – комплементарный транзистор «металл-оксид-полупроводник»

Общий вид транзисторов III-V



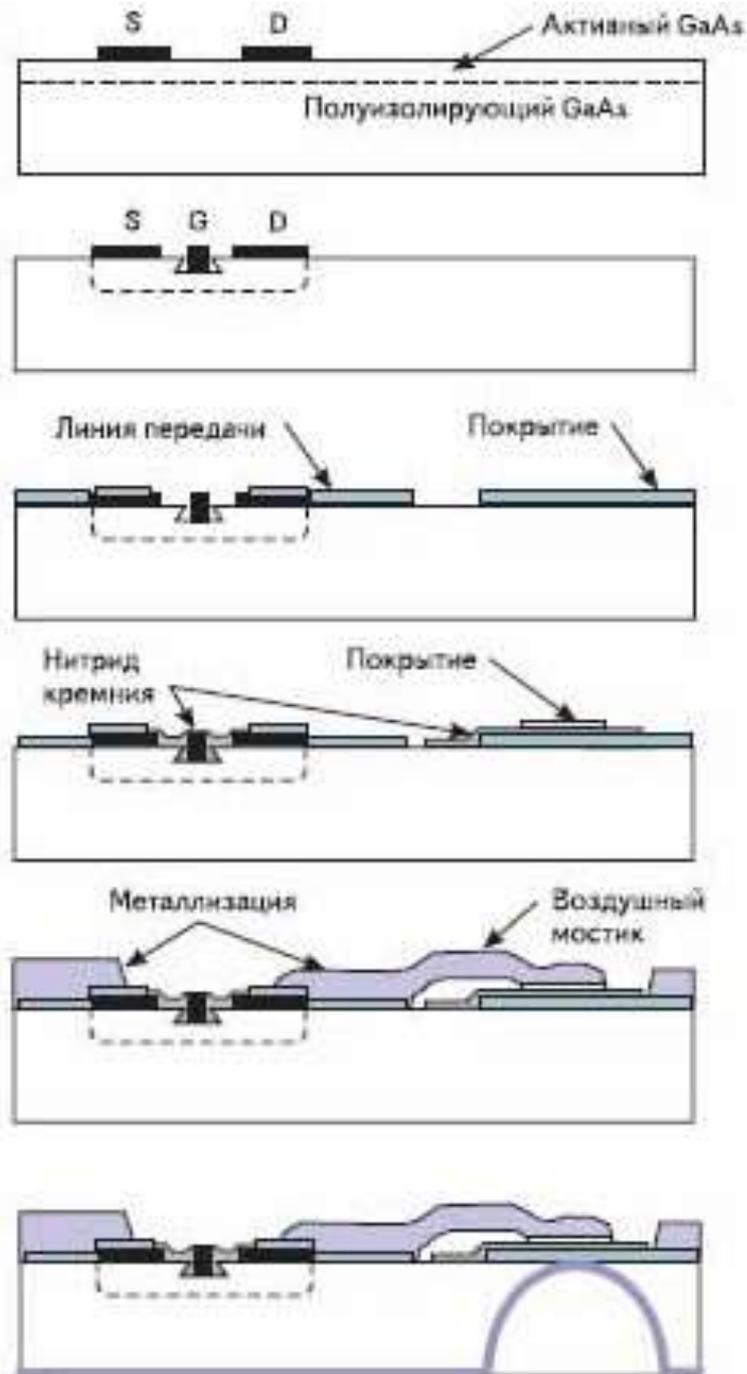
Рабочая частота → 100 ГГц

MESFET



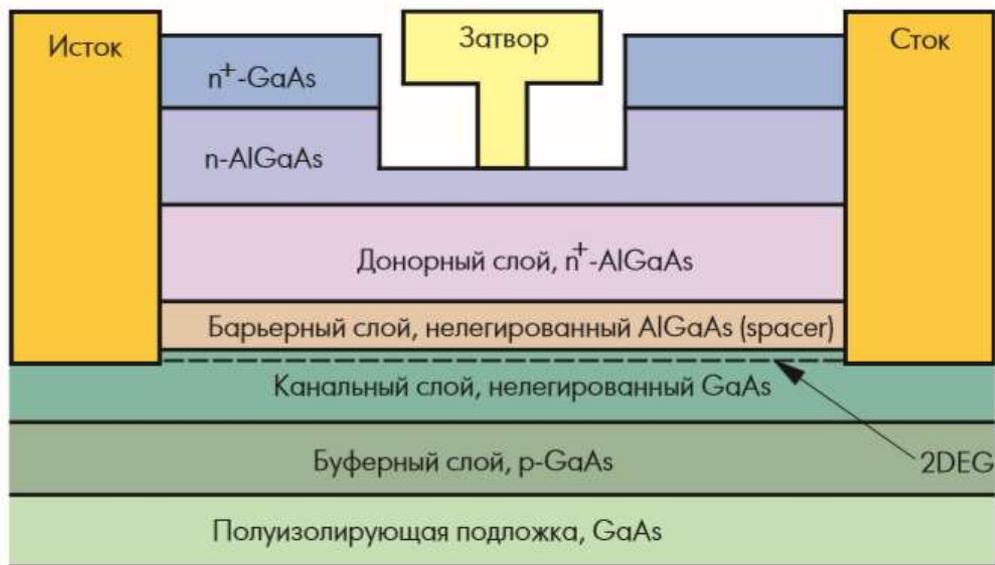
Типовая технология производства MESFET

1. Изготовление тонкопленочных резисторов (омических контактов).
2. Изолирование (ионная имплантация бора) и формирование затвора.
3. Нанесение металлических контактов и формирование межсоединений.
4. Обработка обратной стороны подложки (формирование переходных отверстий).

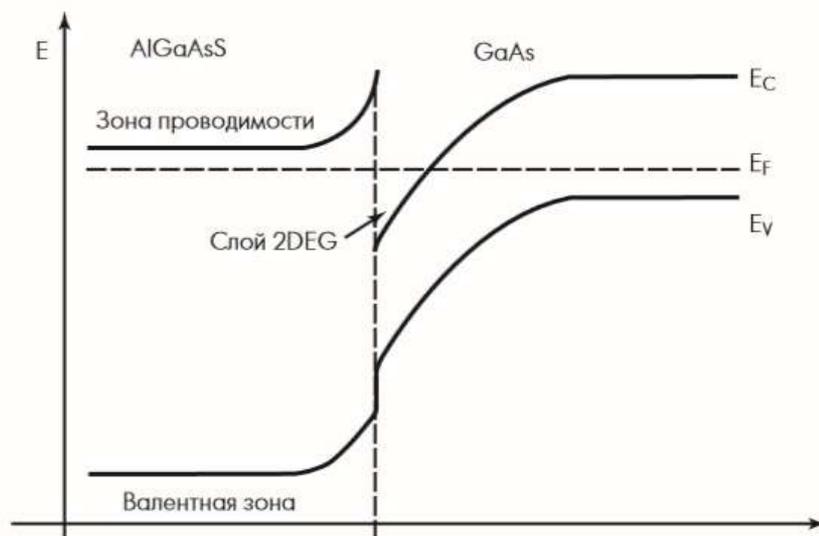


HEMT (ГПТШ) более подробно:

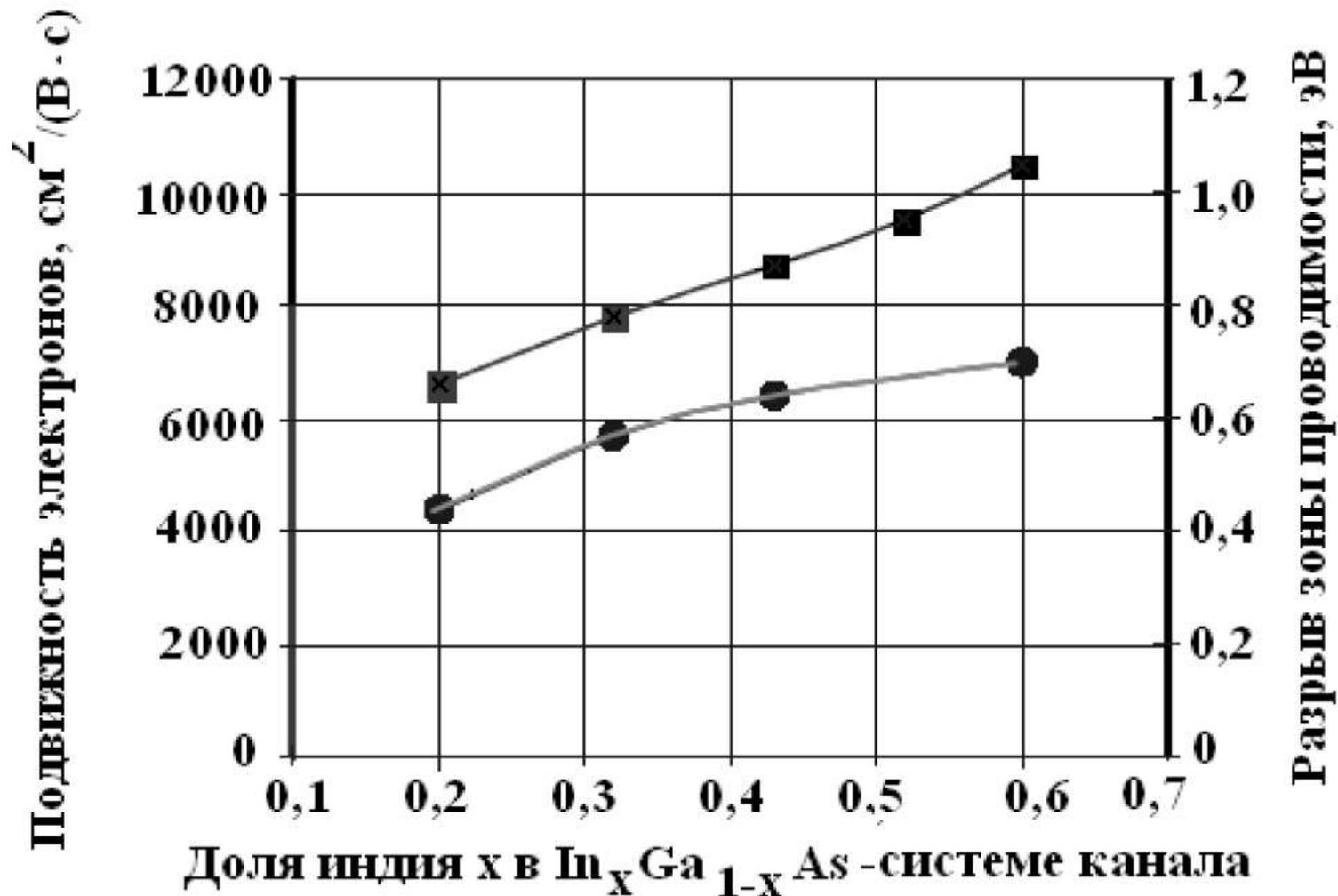
а)



б)

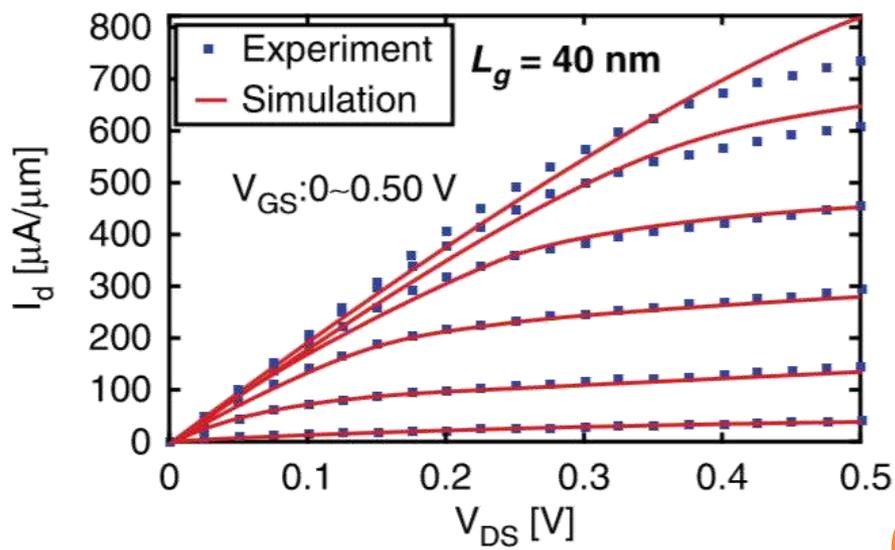
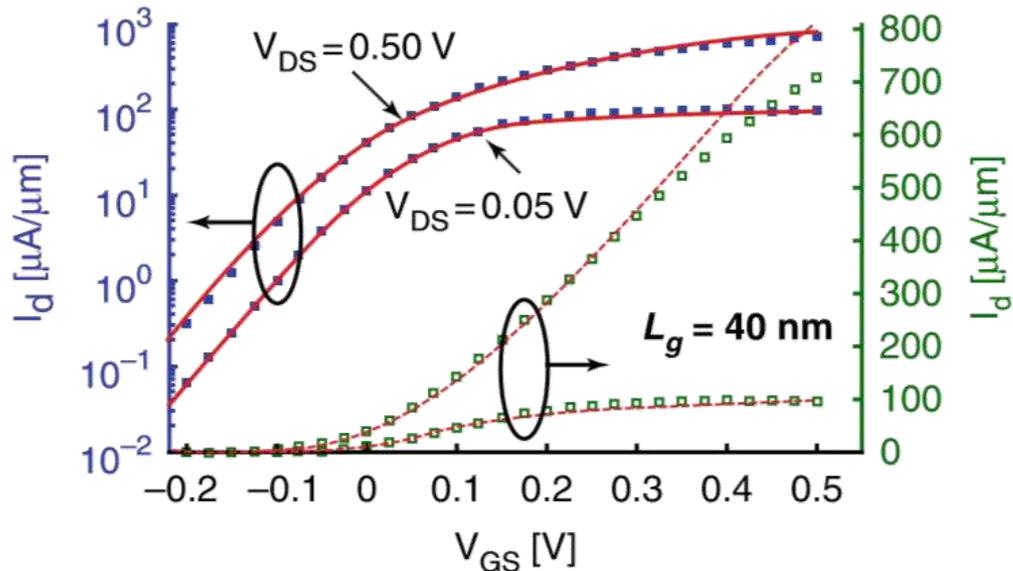
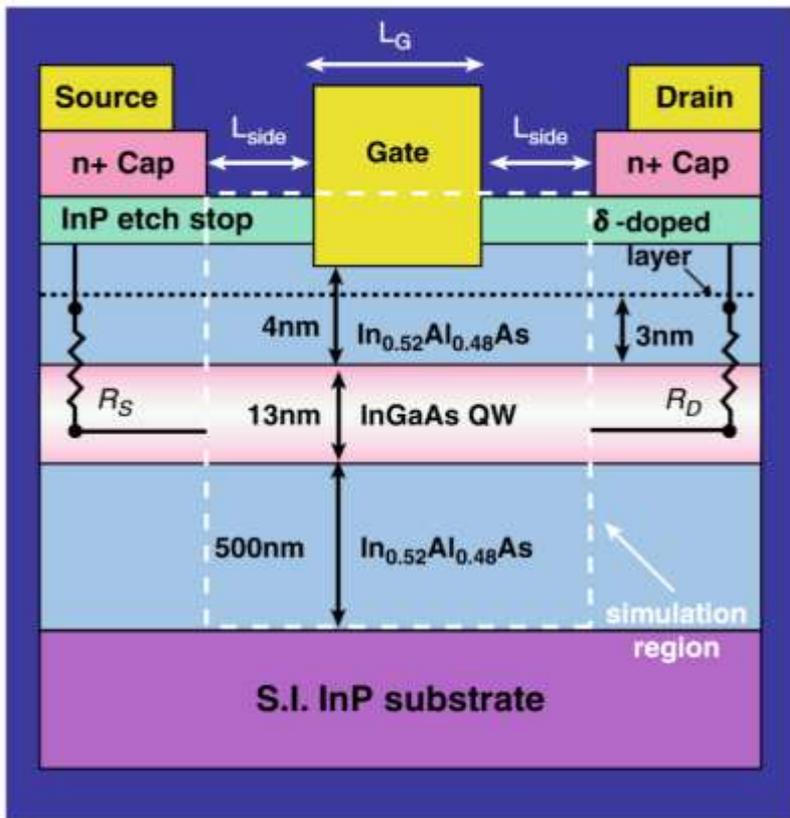


рНЕМТ : индий рулит

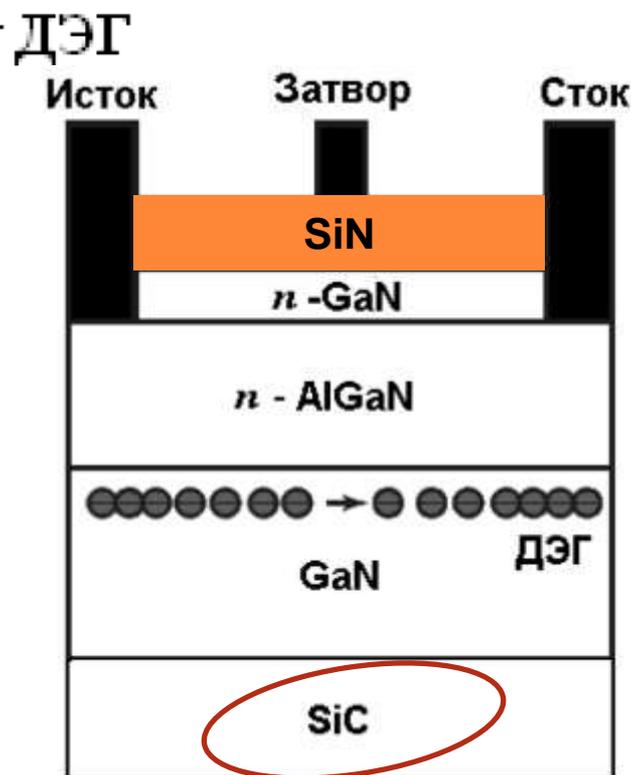
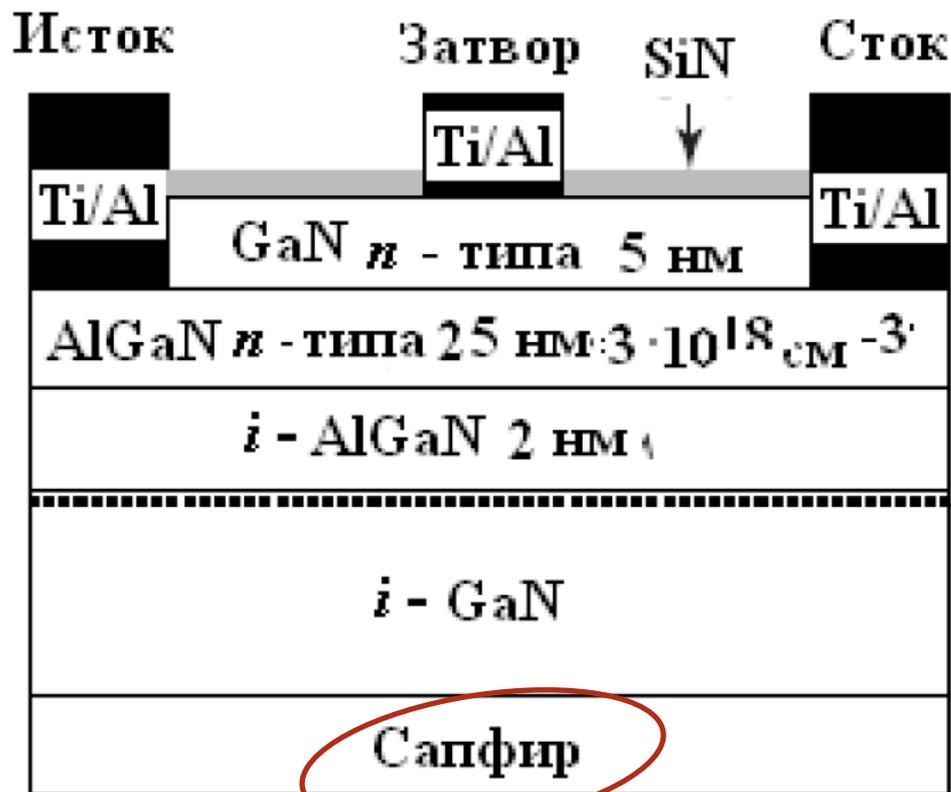


Рабочая частота → 400 ГГц (в настоящее время – 200 ГГц)

рНЕМТ : индий рулит

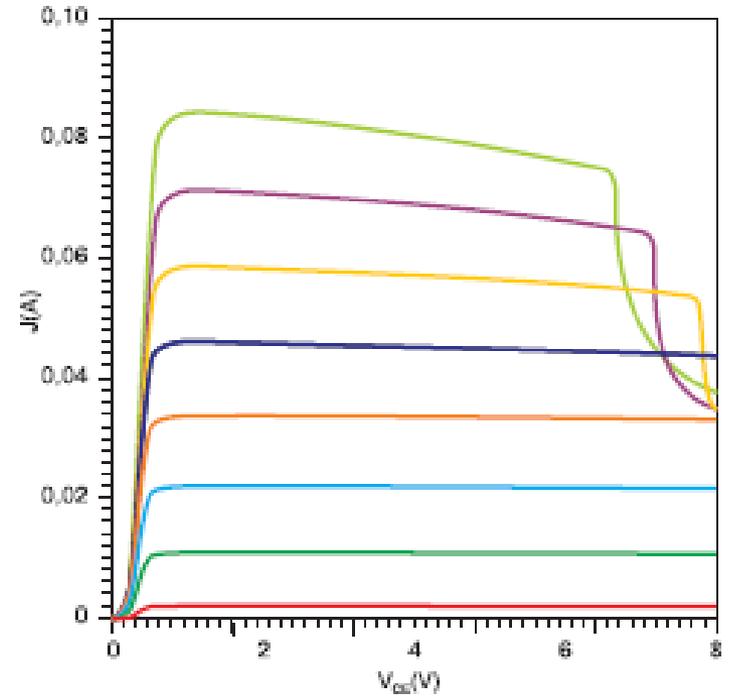
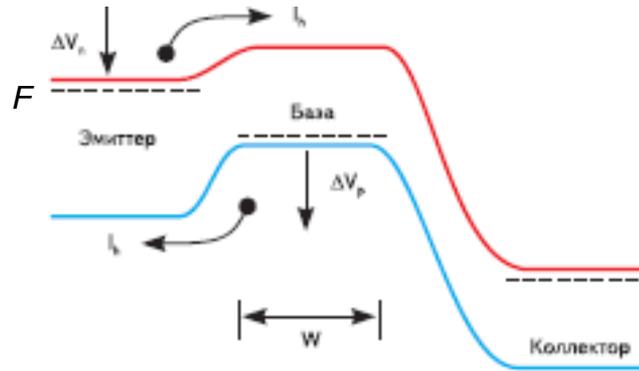
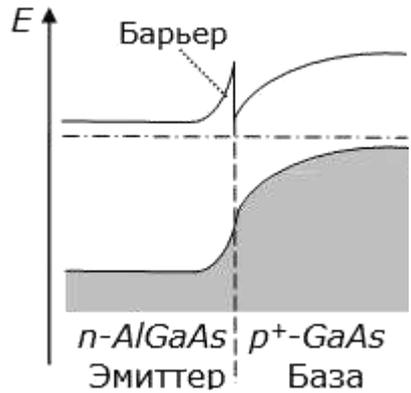


HEMT GaN:

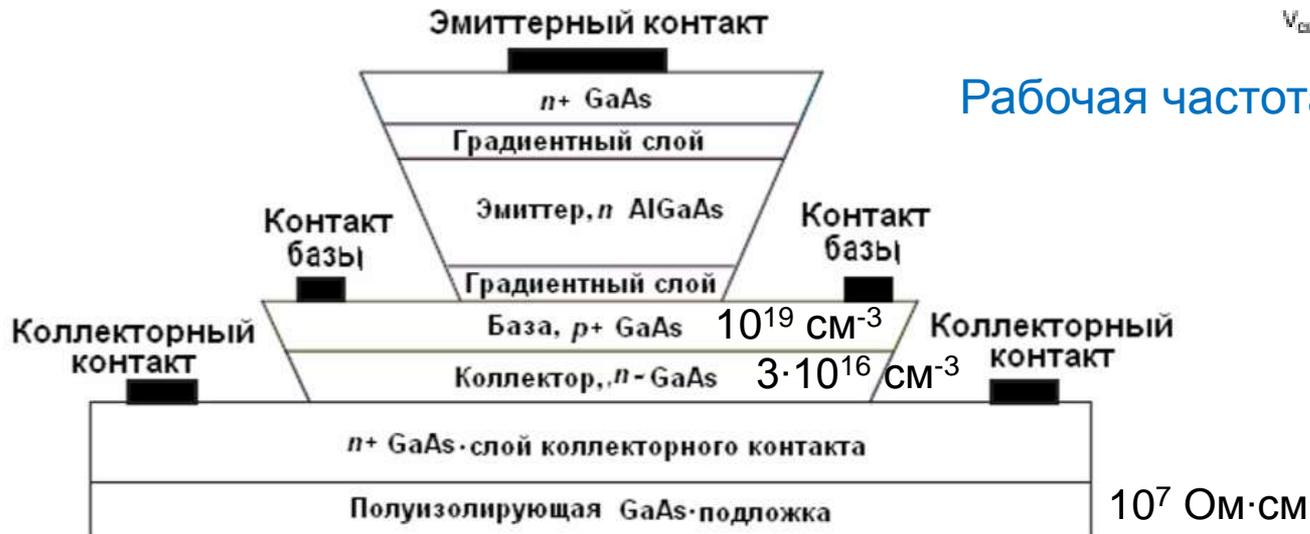


Рабочая температура \rightarrow 600 °C

Биполярный транзистор с гетеропереходом (НВТ):

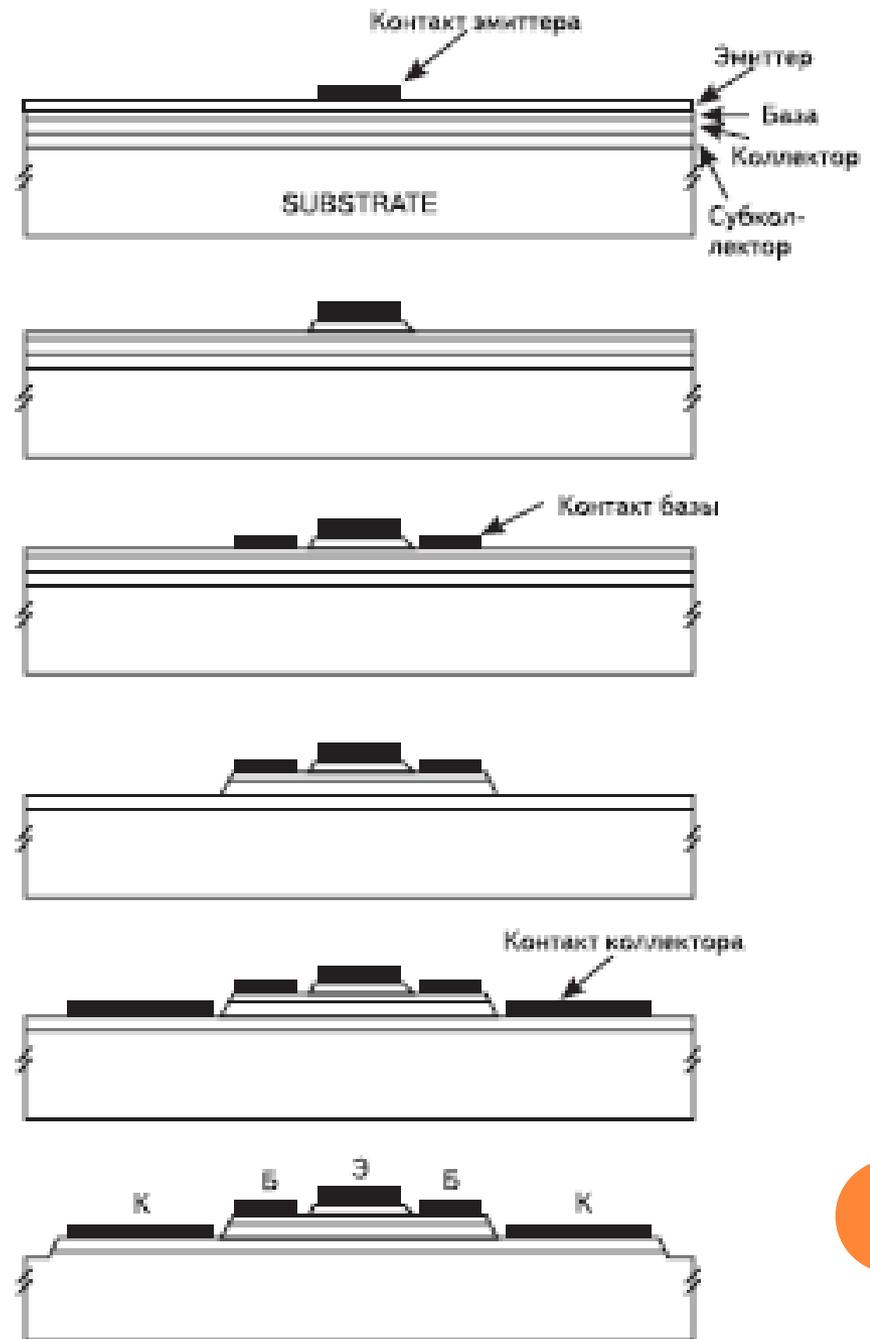


Рабочая частота → 100 ГГц

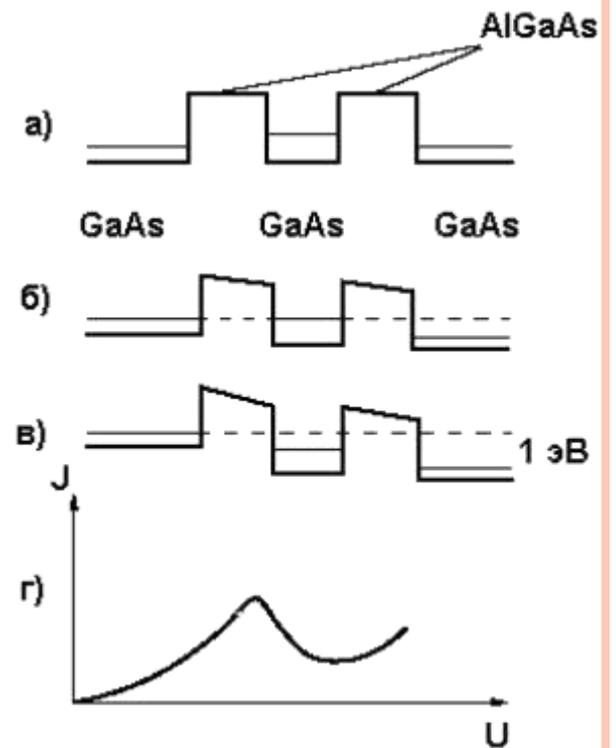
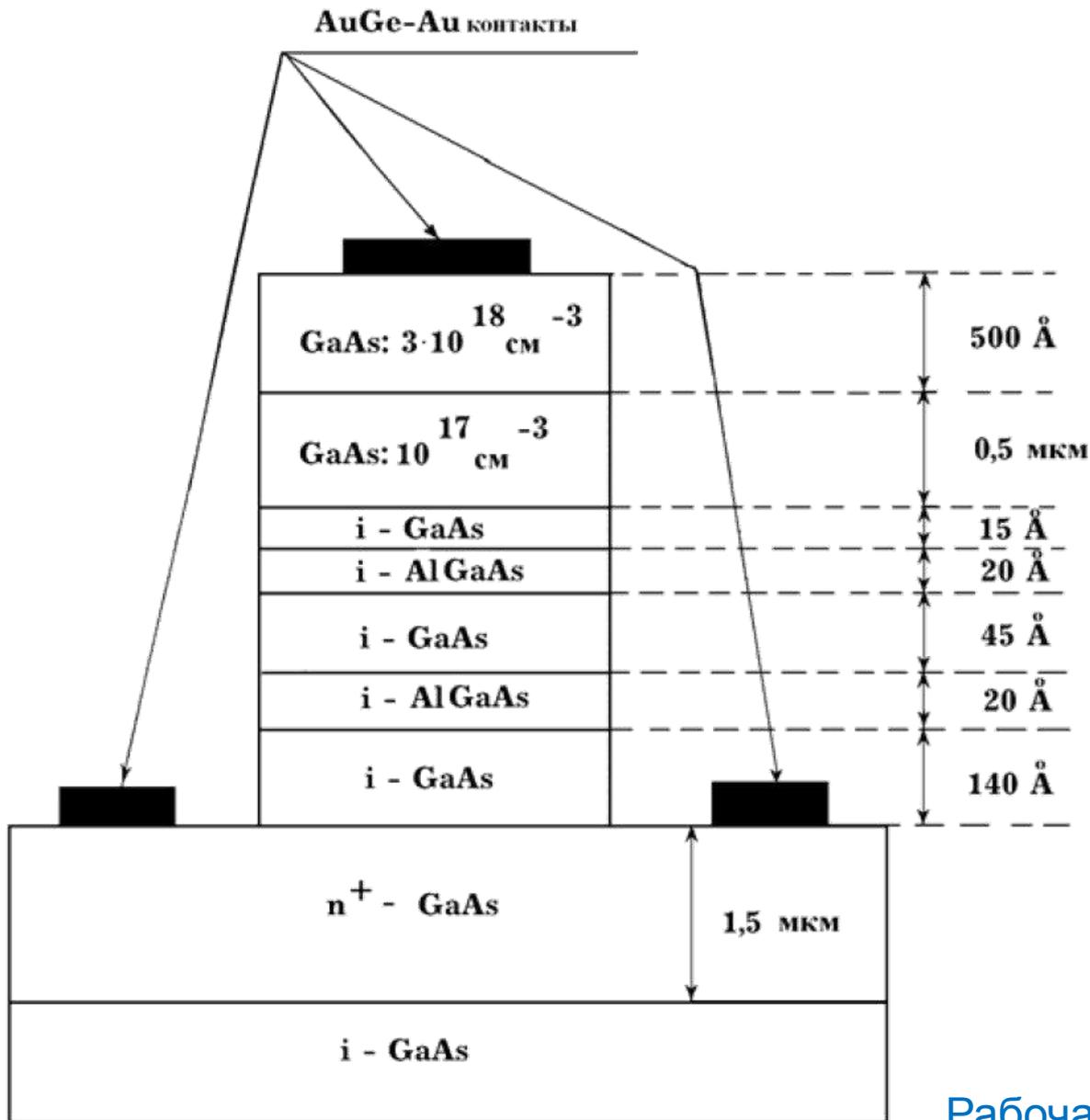


Типовая технология производства НВТ

- состоит из нескольких этапов травления для открытия нужных областей и формирования электрических контактов на каждом слое. В заключение устройство изолируется и на нем формируются требуемые межсоединения.

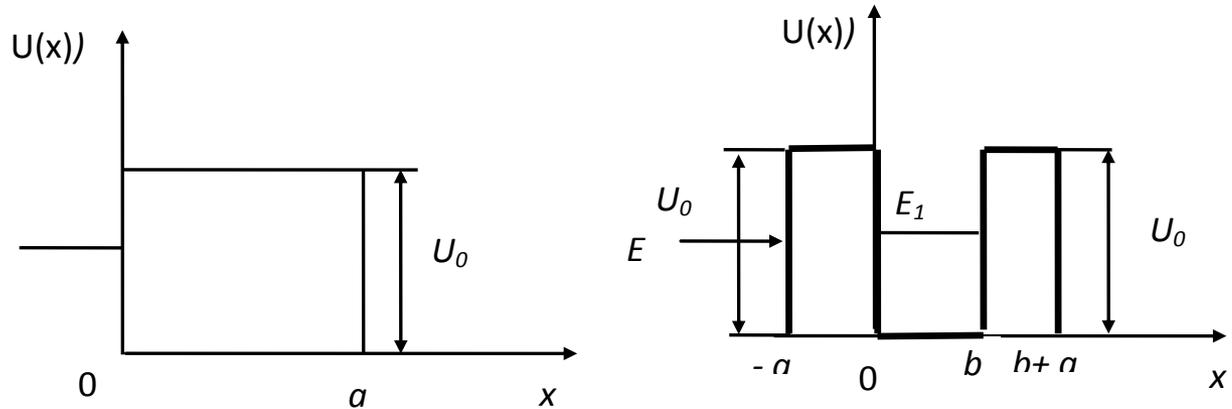


Резонансно-туннельный диод



Рабочая частота → 1 ТГц

Резонансно-туннельный диод



$$U_0 \rightarrow \infty \quad E \psi = \frac{\hbar^2}{2m^*} \psi'' \quad \psi(0) = \psi(b) = 0$$

Уравнение Шредингера в этом случае имеет решение:

$$\psi = A \sin \frac{p_n}{\hbar} x; \quad p_n = \frac{\pi n}{b}; \quad E_n = \frac{p_n^2}{2m^*} = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2m^* b^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

- энергетический спектр электронов носит дискретный характер.

$$E_R = E_F = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^* b^2} \quad - \text{резонансный уровень } (n=1).$$

Для потока электронов с энергией E : $\psi = q \exp(i \frac{p}{\hbar} x) + D \exp(-i \frac{p}{\hbar} x)$

$$p = \sqrt{2m^* E}$$

Резонансно-туннельный диод

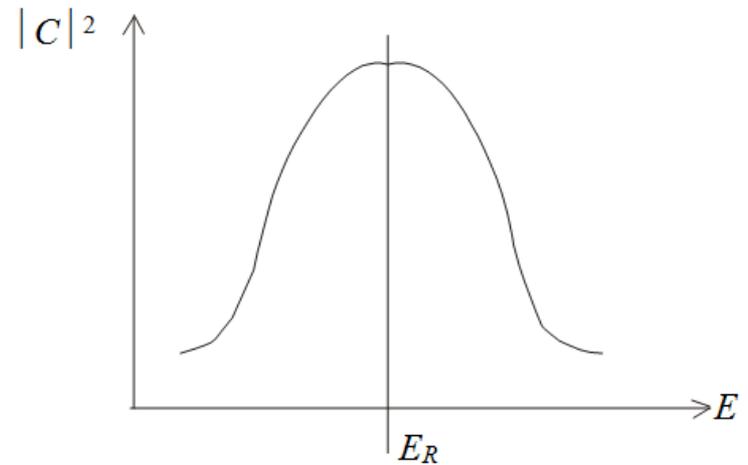
при $x > b+a$ имеем: $\psi(x) = C \exp(i \frac{p}{\hbar} x)$

$$|C|^2 = q^2 \frac{\gamma^2}{(E - E_R)^2 + \gamma^2} \quad \gamma \tau_\gamma = \hbar$$

Число электронов N в потенциальной яме определяется из уравнения:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\frac{N}{\tau_\gamma} + \frac{\gamma^2 q^2}{(E - E_R)^2 + \gamma^2}$$

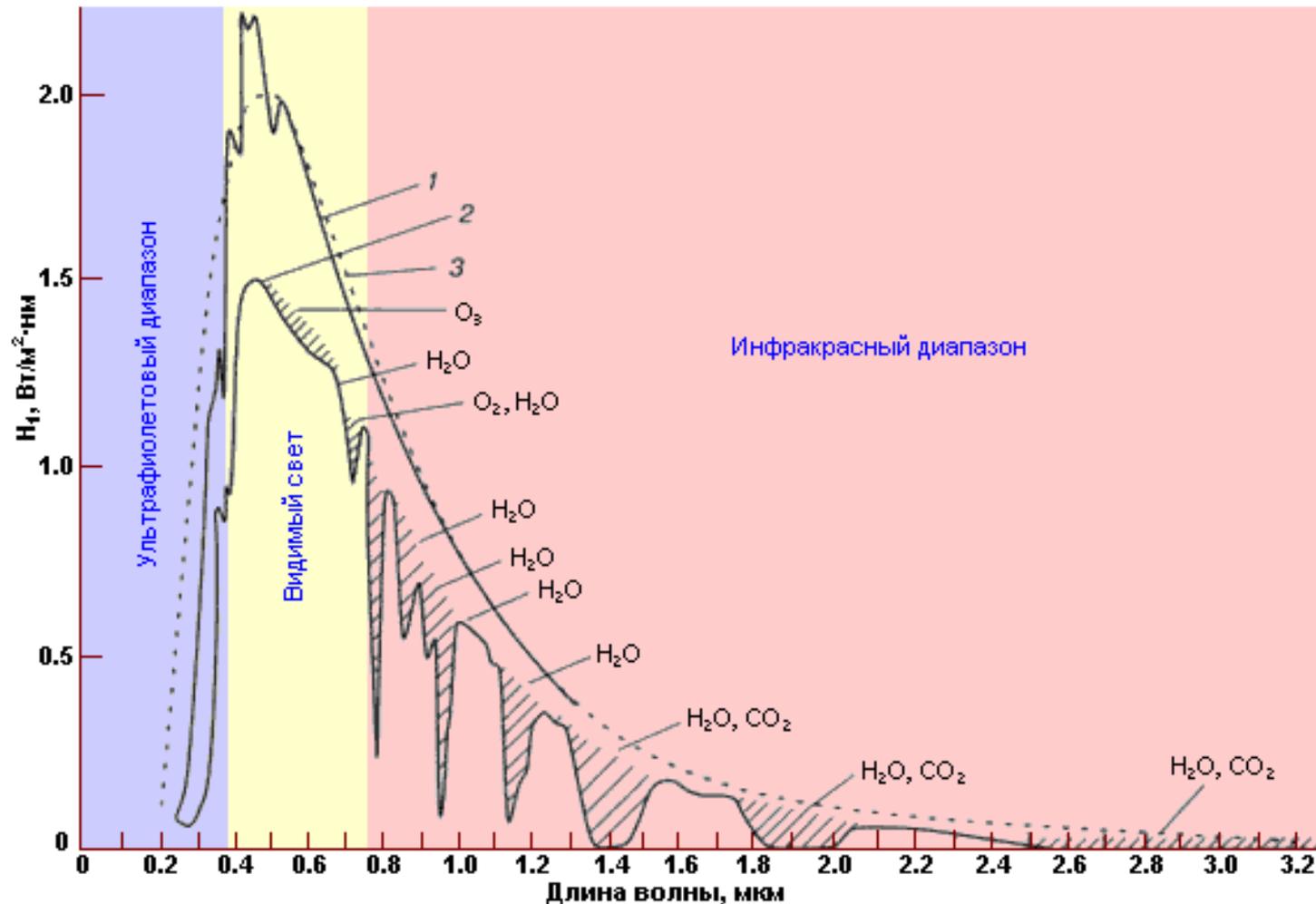
$$N_0 = \frac{\gamma \cdot q^2 \hbar}{(E - E_R)^2 + \gamma^2}$$



Поток электронов создается постоянным полем \mathcal{E}_0 , приложенным к структуре; тогда разность потенциалов $V_0 = \mathcal{E}_0 (b+2a)$. Поле приводит к смещению резонансного уровня:

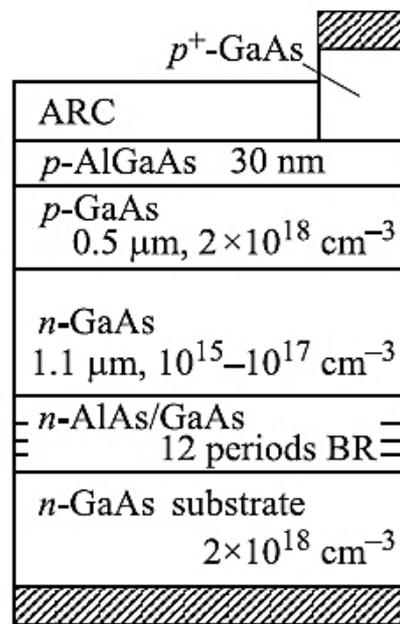
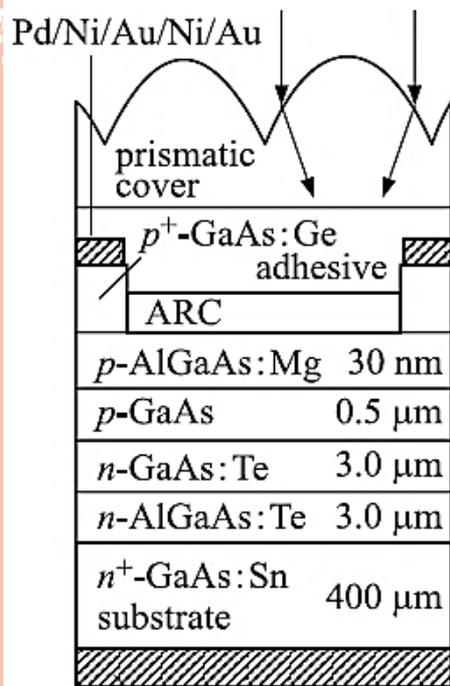
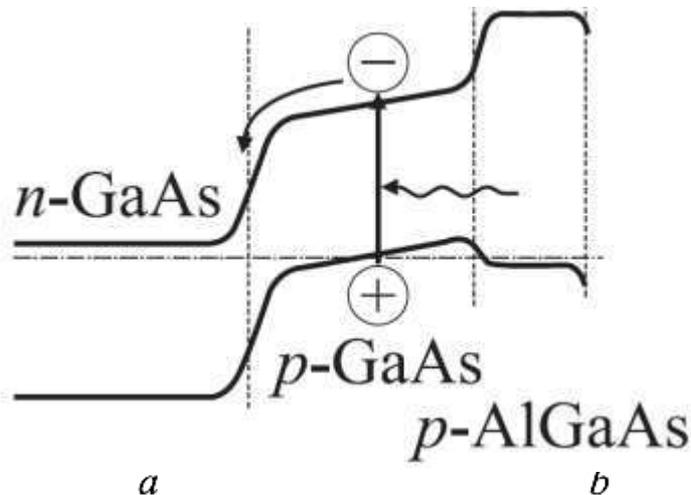
$$E_R = E_{R0} - eV_0 / 2, \quad j = \frac{N_0}{\tau_\gamma} = \frac{\gamma^2 q^2}{(E_F - E_{R0} + eV_0 / 2)^2 + \gamma^2}$$

Солнечные элементы



То, что гетеропереходные солнечные элементы на основе GaAs могут эффективно работать при значительном (в сотни и тысячи раз) концентрировании светового потока, было отмечено ещё на рубеже 1970-1980х годов, и сейчас успешно используется.

Солнечные элементы GaAs



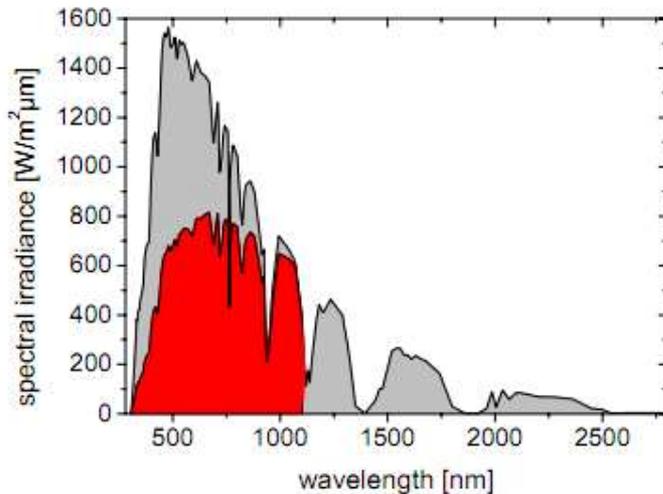
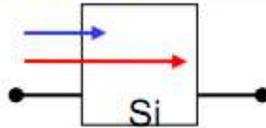
Au: Ge/Ni/Au

Прогресс в сфере солнечных элементов на основе GaAs был обусловлен применением метода газофазной эпитаксии из паров металлоорганических соединений. При этом широкозонное окно AlGaAs стало выполнять также функцию третьей составляющей в трёхслойном интерференционном антиотражающем покрытии фотоэлемента (ARC). Был введён также тыльный широкозонный слой, обеспечивающий вместе с фронтальным слоем двухстороннее ограничение фотогенерированных носителей в пределах области поглощения света. Позже этот слой превратился в брэгговское зеркало.

Солнечные элементы GaAs

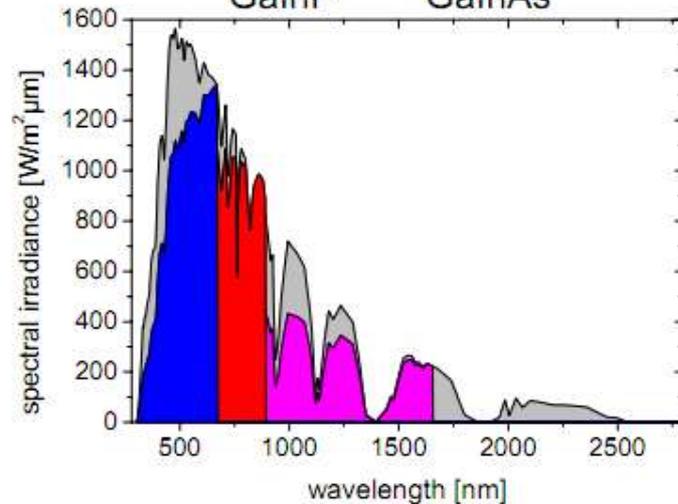
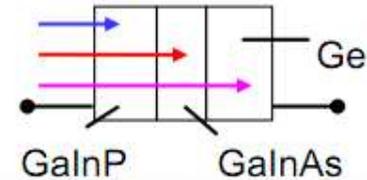
Преимущества каскадных фотоэлектротрансформаторов :
более эффективное использование энергии солнечного излучения

Кремниевые
фотопреобразователи с
одним р-п переходом



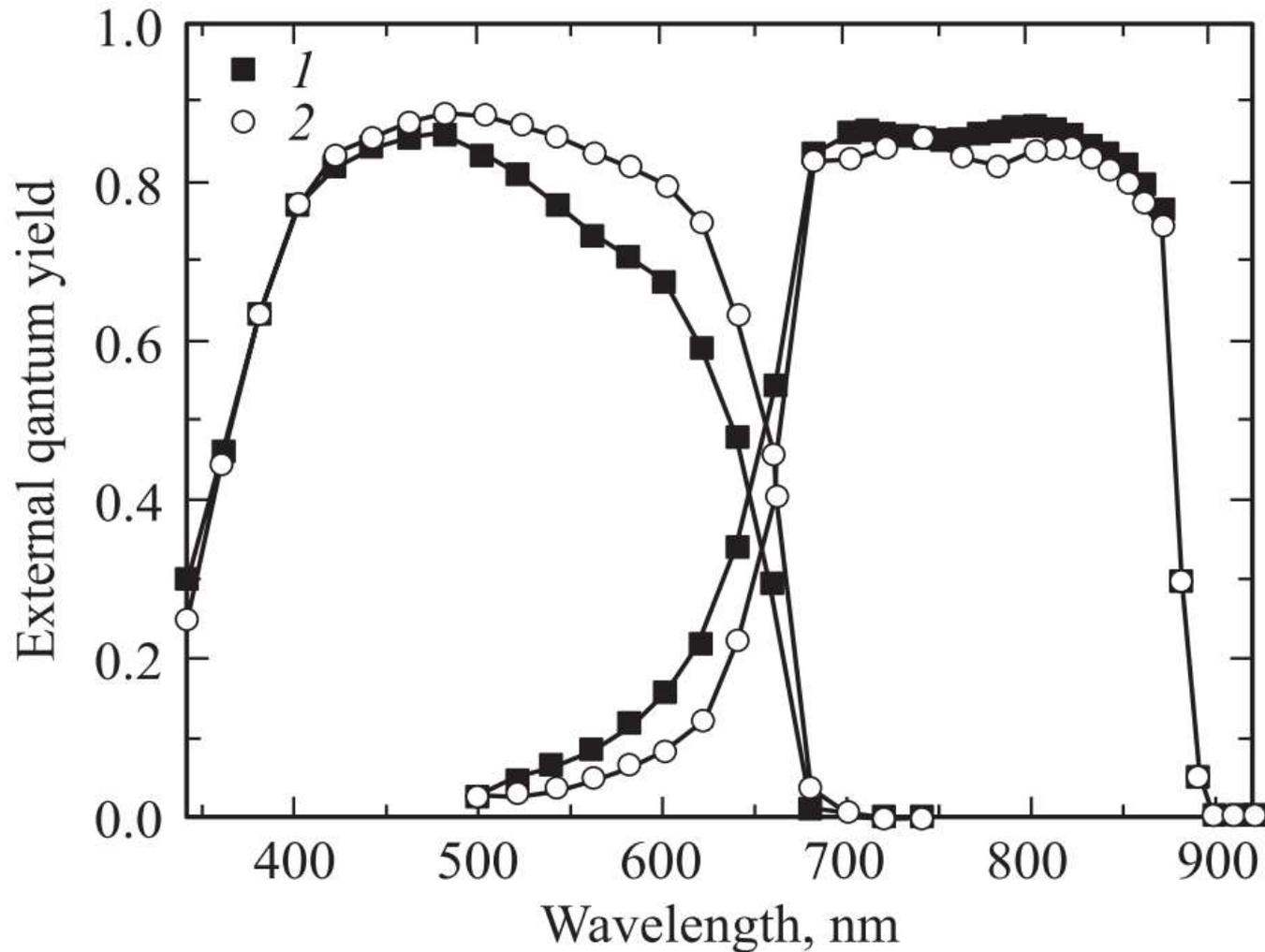
Доля спектра солнечного излучения,
преобразуемая кремниевыми
солнечными элементами

Каскадные фотопреобразователи
на материалах A^3B^5



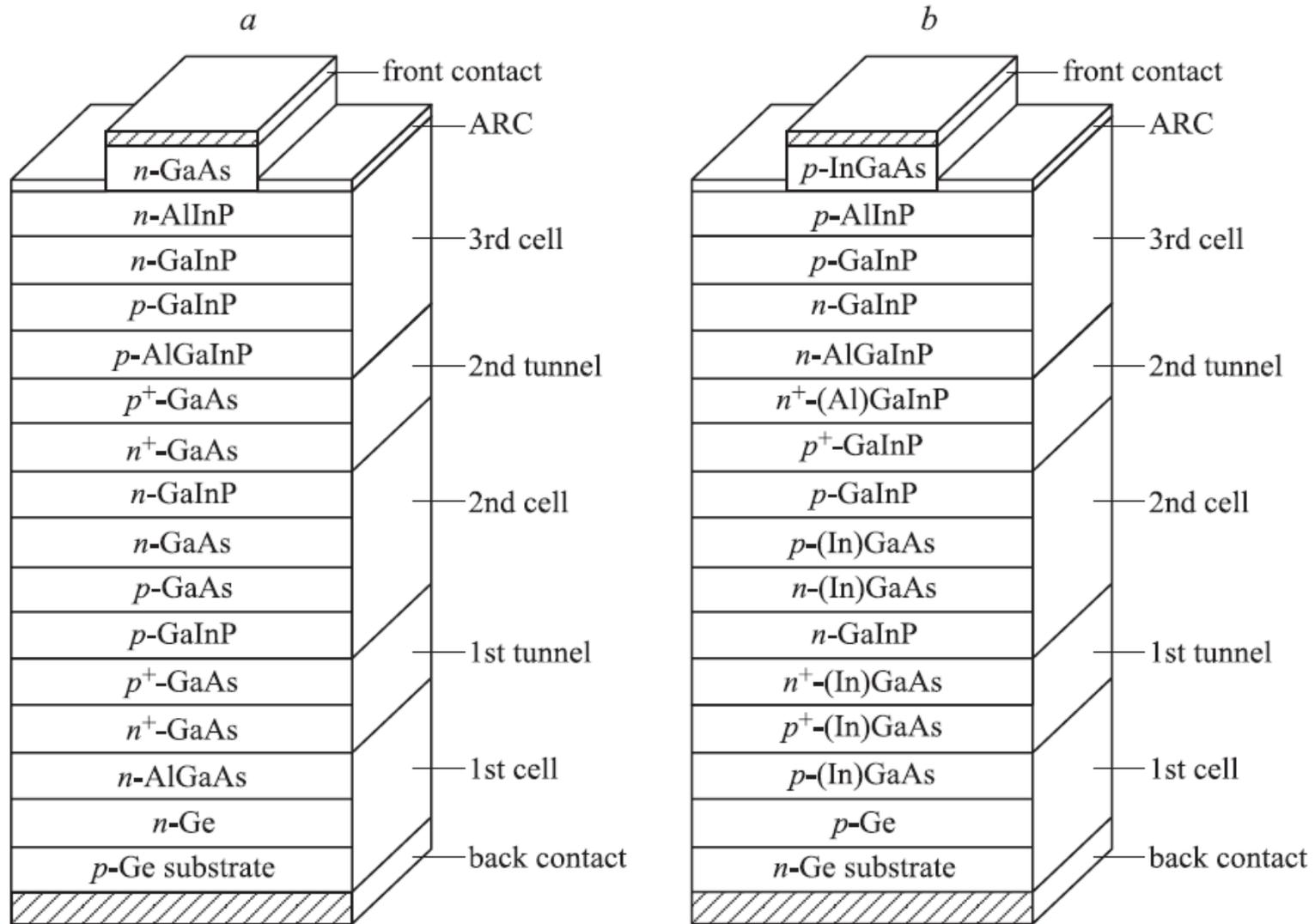
Увеличение доли солнечного спектра,
преобразуемого каскадным
фотопреобразователем с тремя р-п
переходами в материалах GaInP,
GaInAs и Ge

Солнечные элементы GaAs



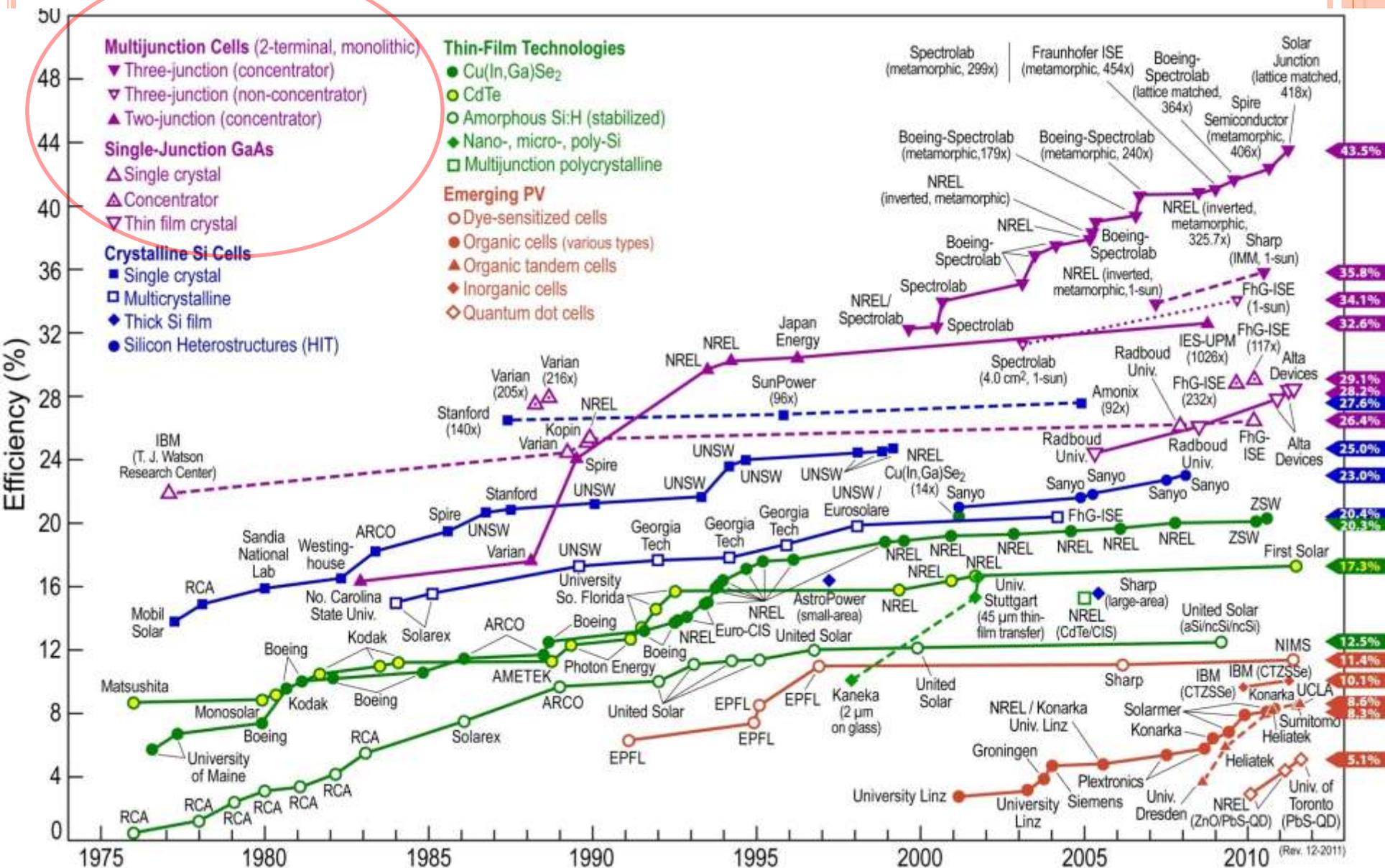
Реальная спектральная зависимость внешнего квантового выхода двухпереходных солнечных элементов GaInP/GaAs, толщина GaInP-элемента: 1 - 450 нм, 2 - 700 нм.

Солнечные элементы GaAs



Общая толщина многослойной эпитаксиальной структуры не превышает нескольких микрон.

Солнечные элементы – перспективы использования



aspire invent achieve

