

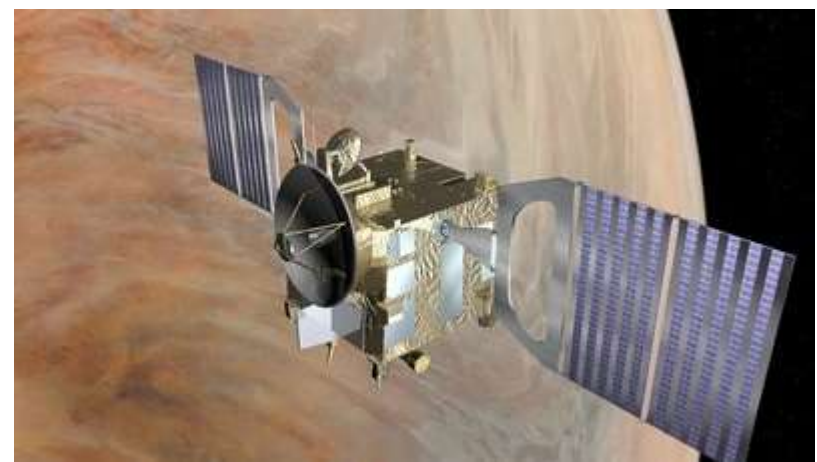


**ФИЗИКА  
МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ  
ПРИБОРОВ**

**III-V**

**3.**

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



## Доноры и акцепторы для GaAs

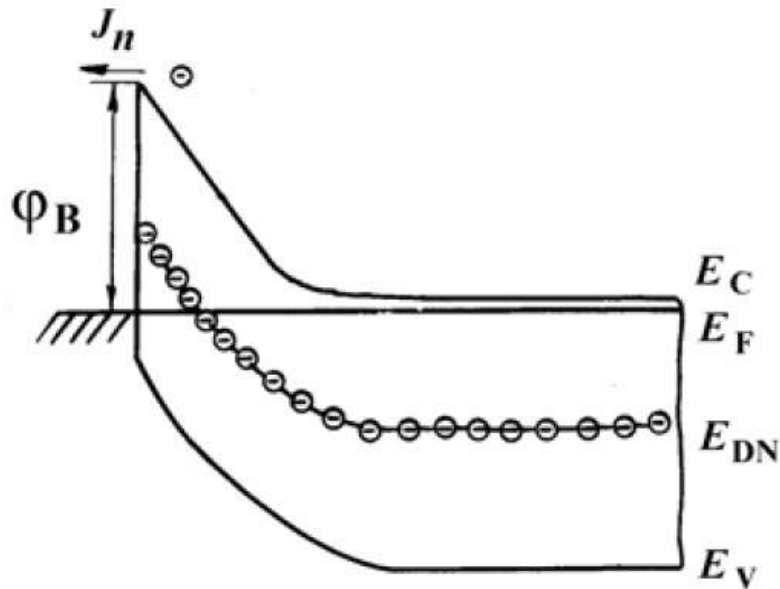
Нелегированные эпитаксиально выращенные слои GaAs, обладают **p-типом** проводимости с концентрацией свободных дырок около  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ . «Фоновой» примесью при этом является углерод (акцептор) с энергией связи 26 мэВ.

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 ( $\sim 28$  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  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Выше этих концентраций морфология поверхности сильно деградирует из-за образования комплексов Mg-As.

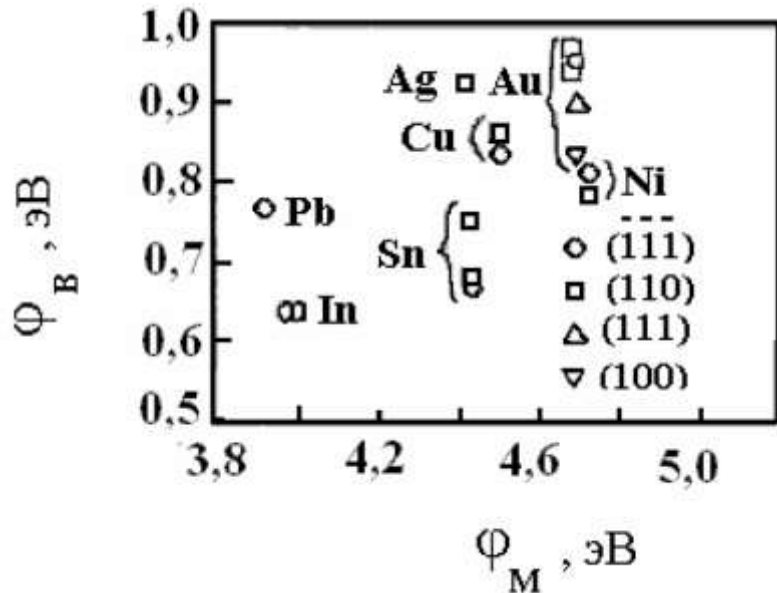
**Zn** и **Cd**, которые нашли широкое применение при легировании в жидкофазной или парофазной эпитаксии, сложно использовать в МВЕ. В качестве донорной примеси в GaAs широко используется Sn.

# Базовая структура – диод Шоттки



Зонная структура  
выпрямляющего контакта  
металл–полупроводник:

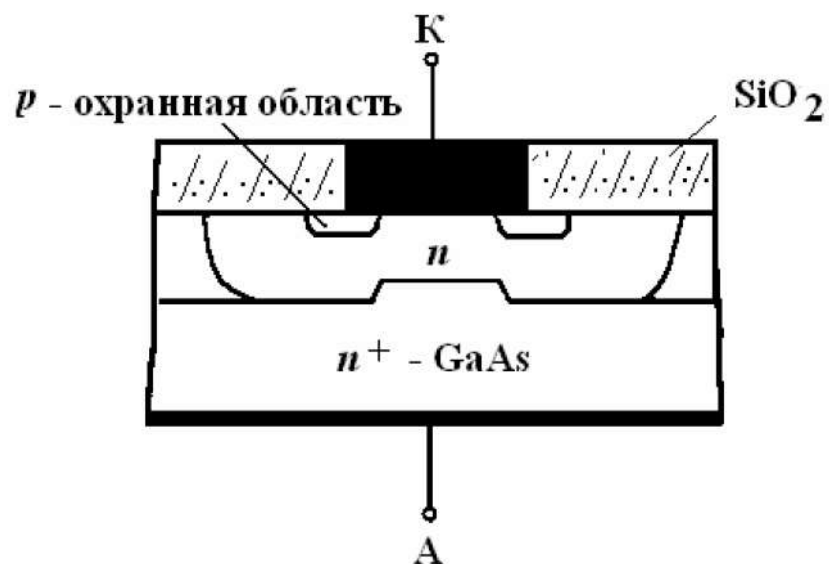
- $J_n$  – ток основных носителей заряда;
- $\phi_B$  – высота потенциального барьера металл–полупроводник;
- $E_C$  – энергия дна зоны проводимости;
- $E_F$  – энергия уровня Ферми;
- $E_{DN}$  – энергия глубоких уровней;
- $E_V$  – энергия потолка валентной зоны



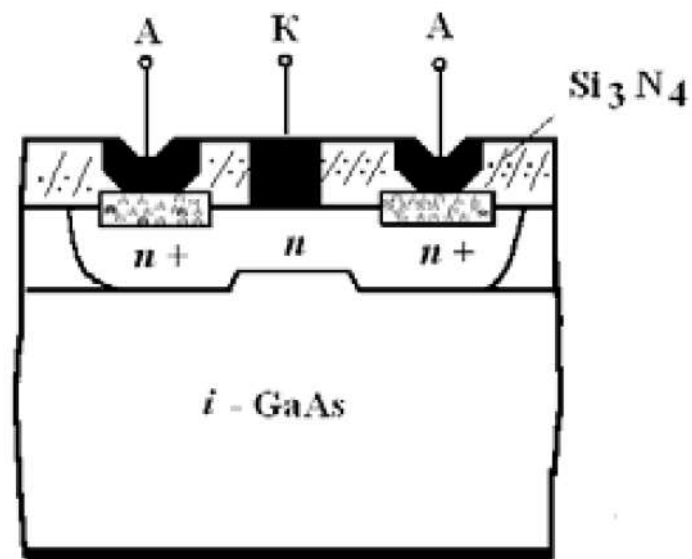
$$J_n = RT^2 S e^{-\frac{\phi_B}{kT}} \cdot \left( e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right)$$

- $R \sim 8 \text{ (A/cm}^2 \cdot \text{K}^2)$  – постоянная Ричардсона для GaAs;
- $S$  – площадь контакта,  $\text{cm}^2$ ;
- $U$  – напряжение на переходе.

# Базовая структура – диод Шоттки

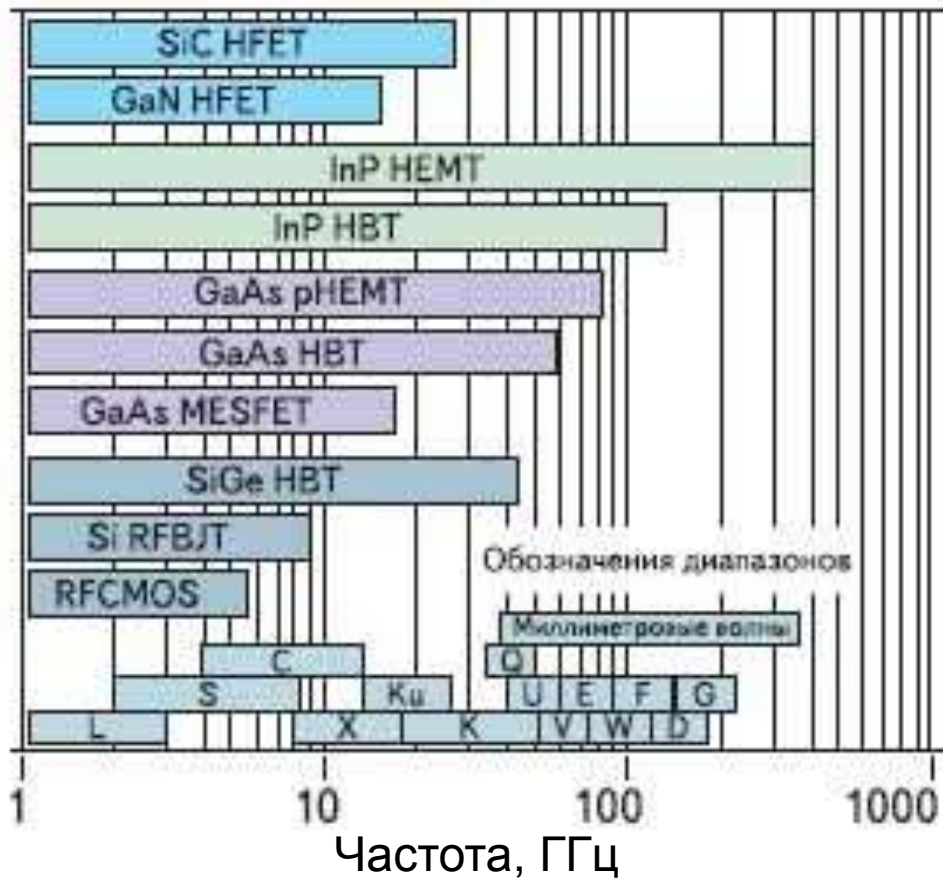


дискретный элемент



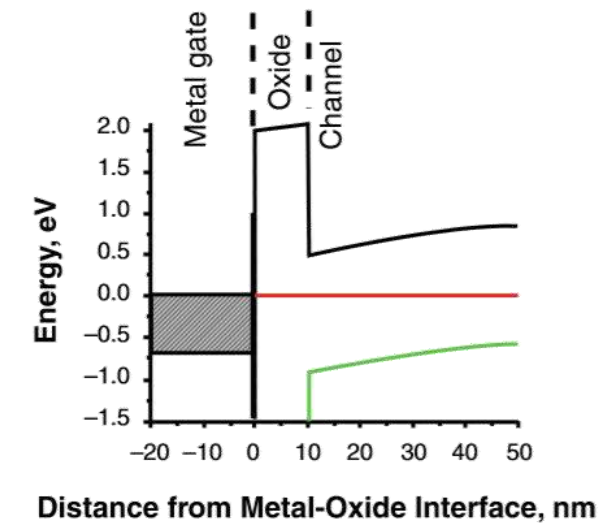
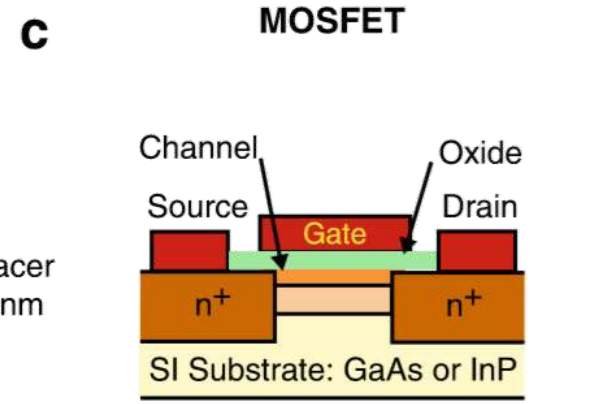
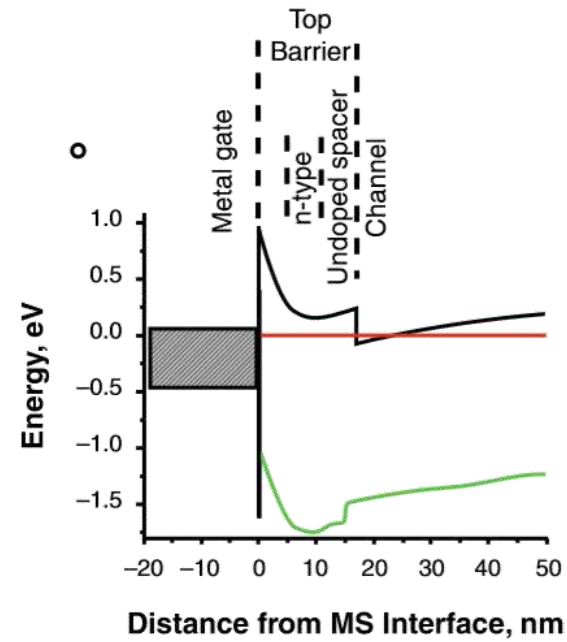
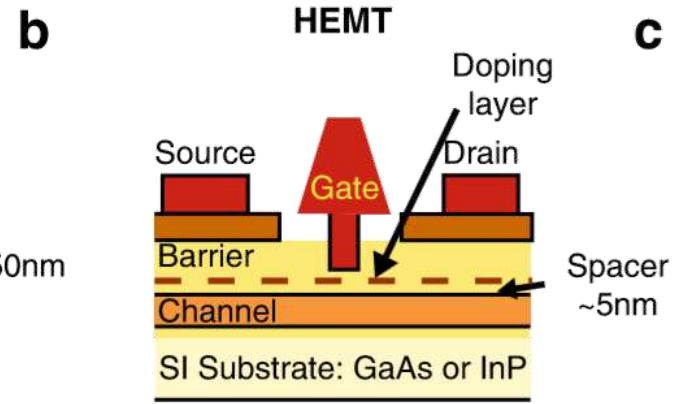
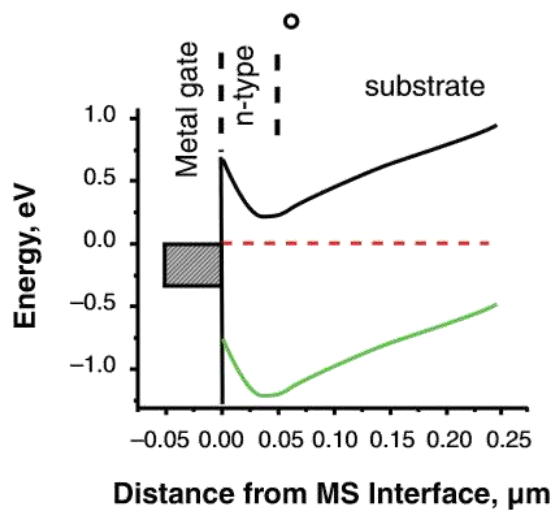
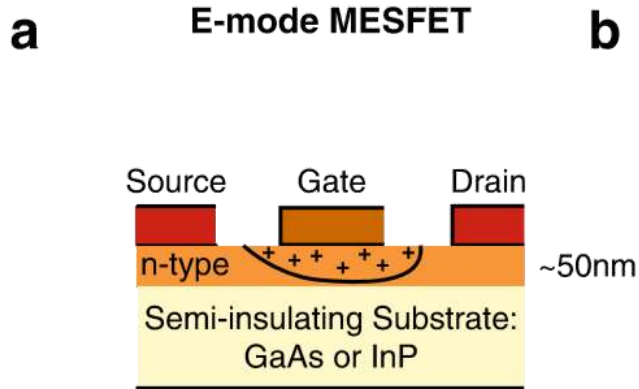
интегральное исполнение

# Предназначение



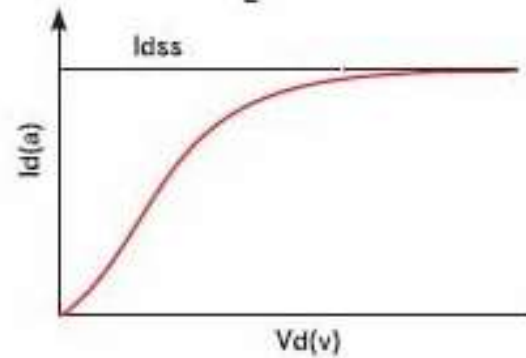
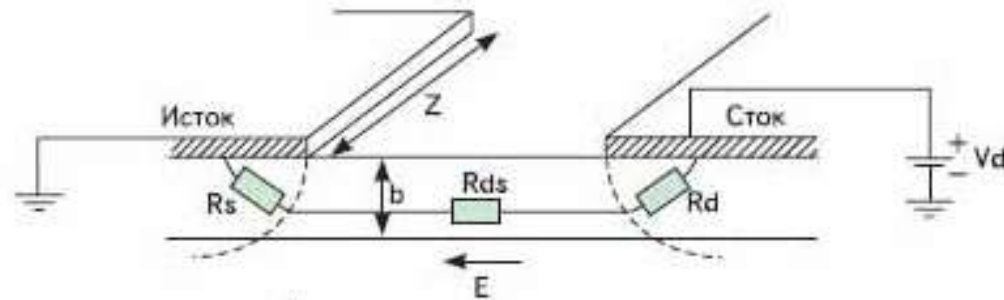
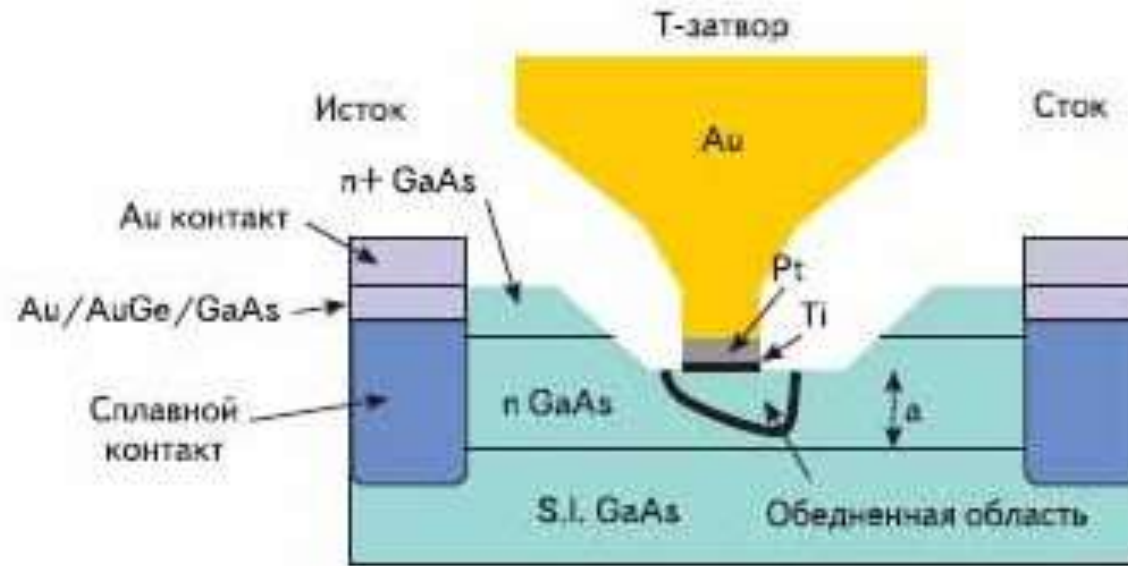
**HFET** – полевой гетеротранзистор,  
**HEMT** – транзистор с высокой подвижностью электронов  
**pHEMT** – псевдоморфный транзистор  
**HBT** – биполярный гетеротранзистор  
**MESFET** – полевой транзистор с барьером Шоттки  
**VJT** – биполярный транзистор  
**CMOS** – комплементарный транзистор «металл-оксид-полупроводник»

# Общий вид транзисторов III-V



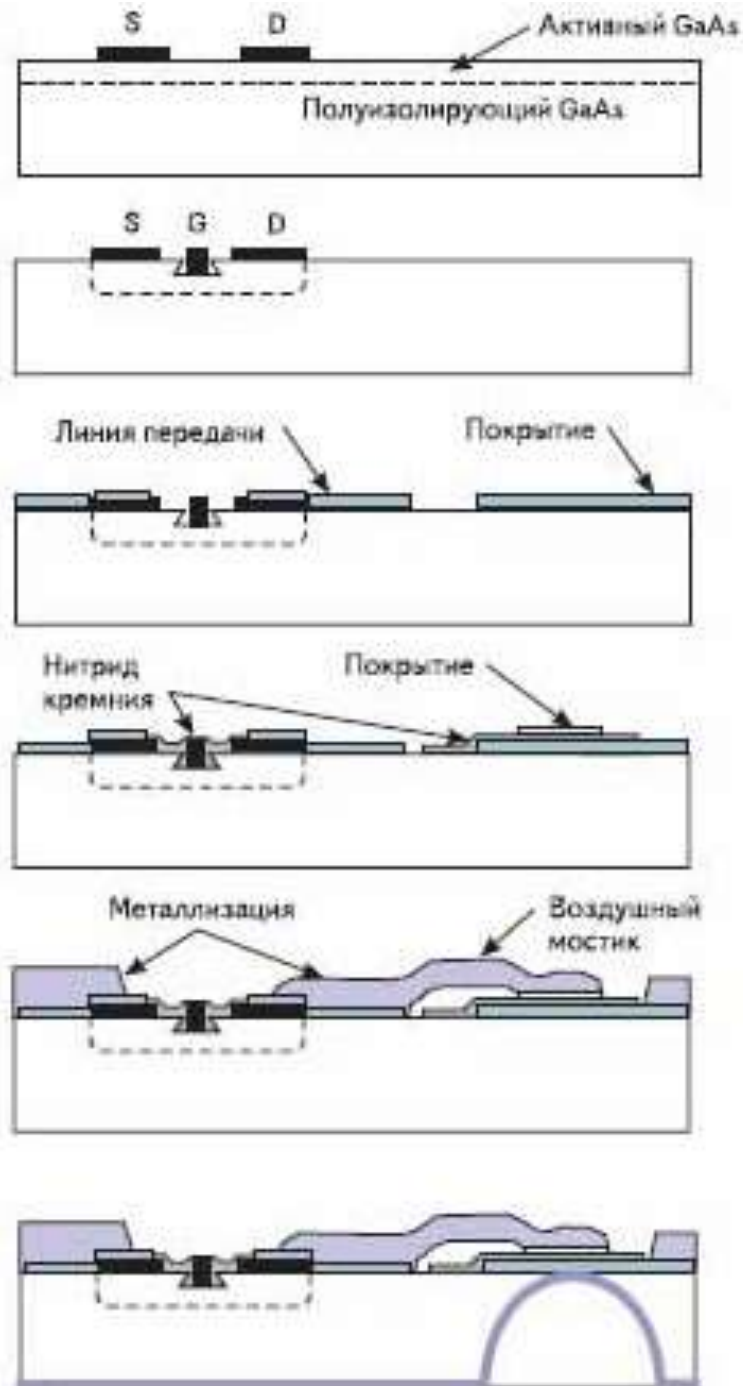
Рабочая частота → 100 ГГц

# MESFET



# Типовая технология производства MESFET

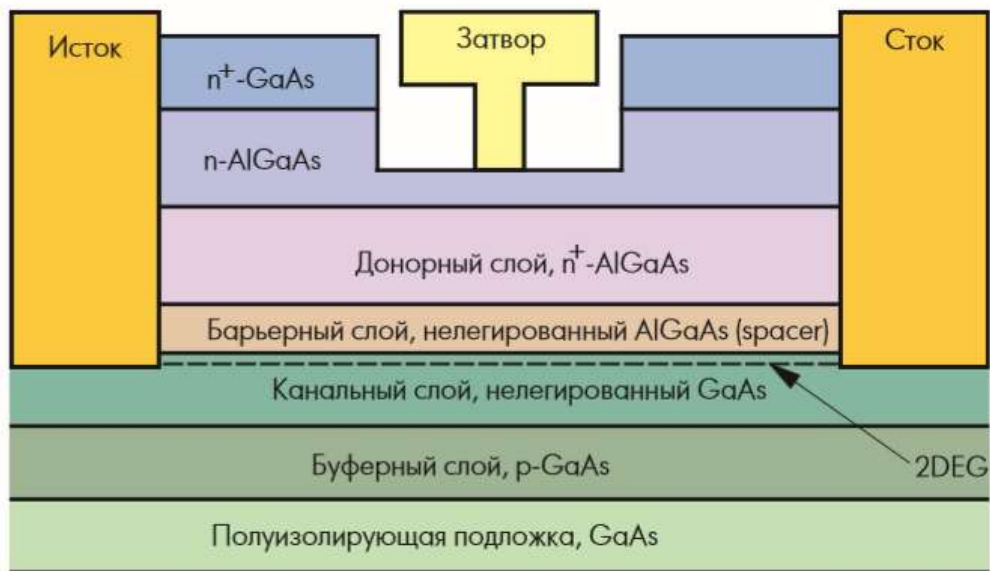
1. Изготовление тонкопленочных резисторов (омических контактов).
2. Изолирование (ионная имплантация бора) и формирование затвора.
3. Нанесение металлических контактов и формирование межсоединений.
4. Обработка обратной стороны подложки (формирование переходных отверстий).



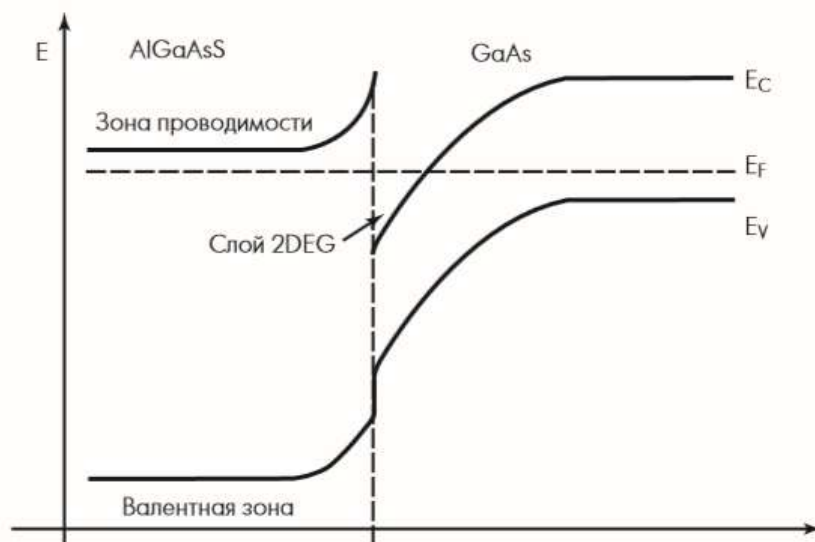


# HEMT (ГПТШ) более подробно:

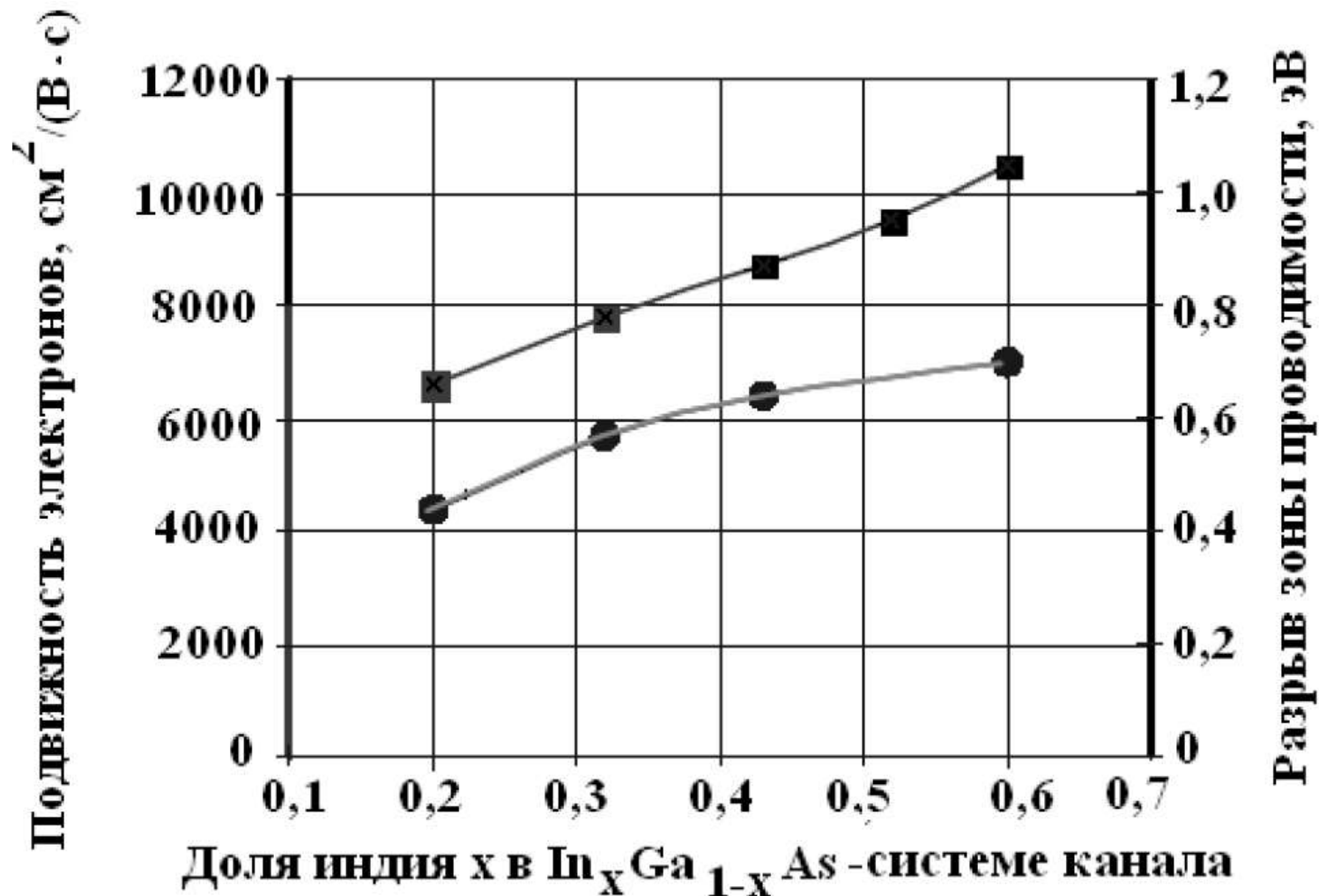
а)



б)

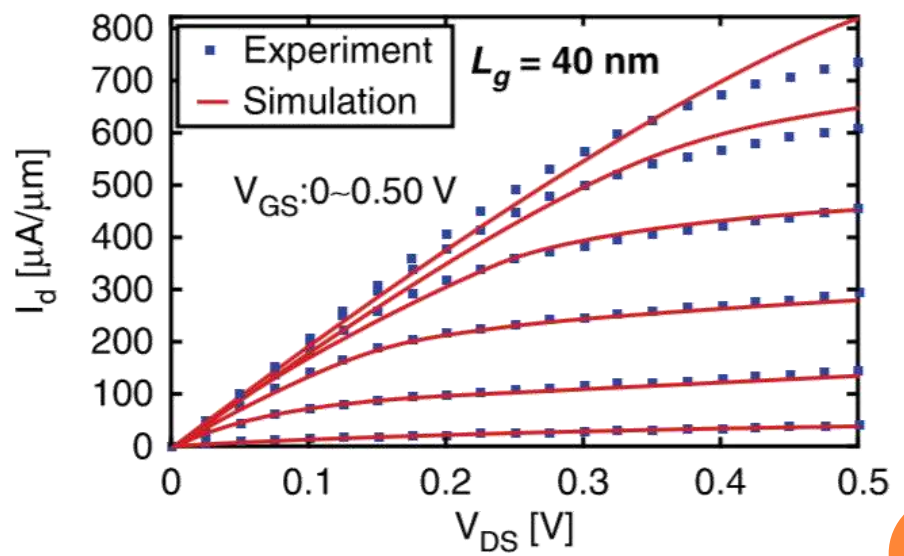
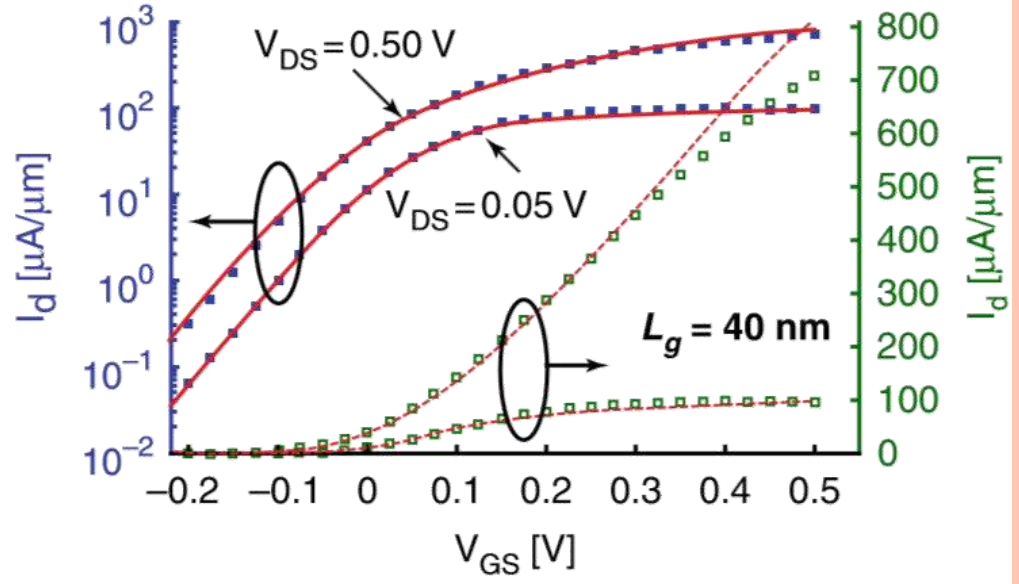
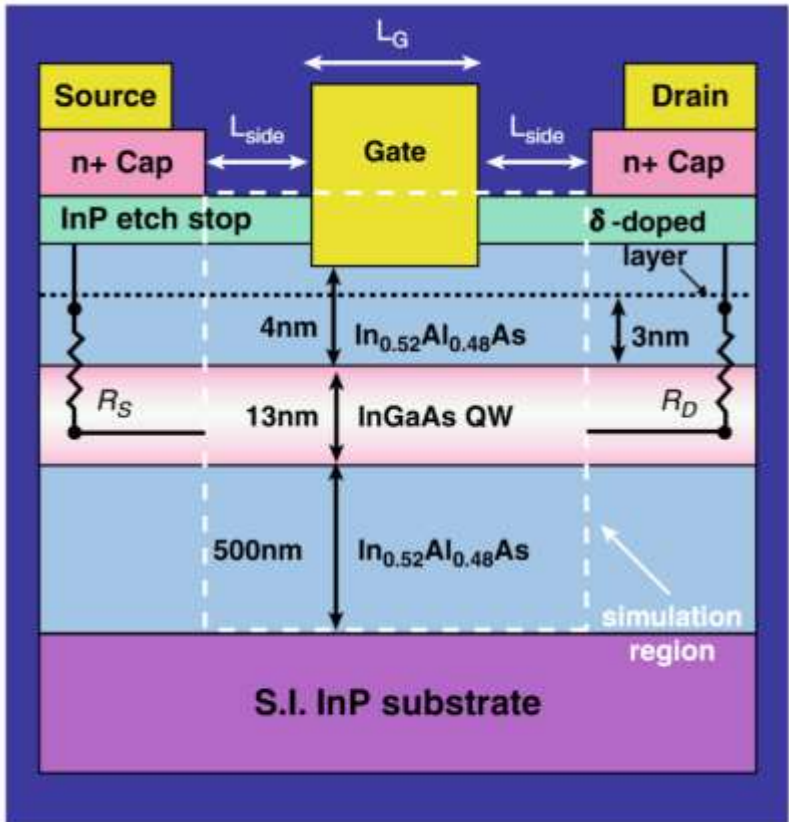


## рНЕМТ : индий рулит

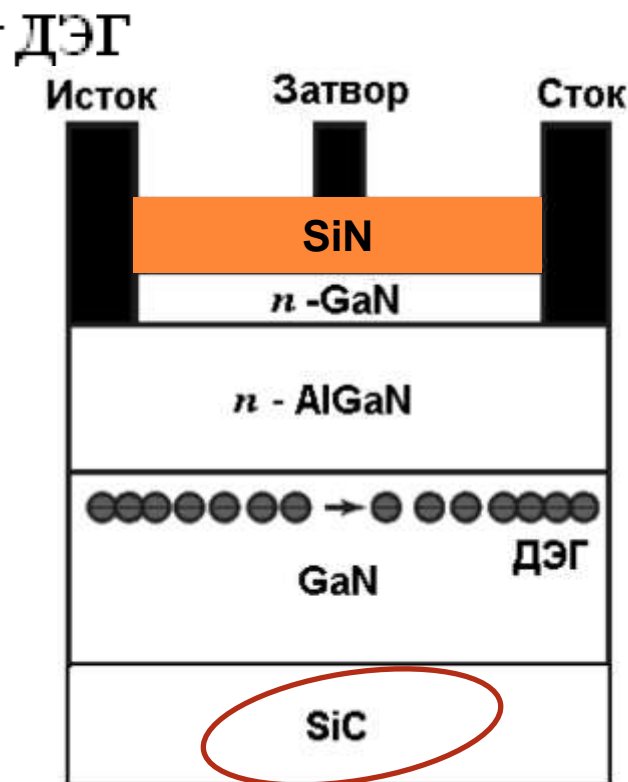
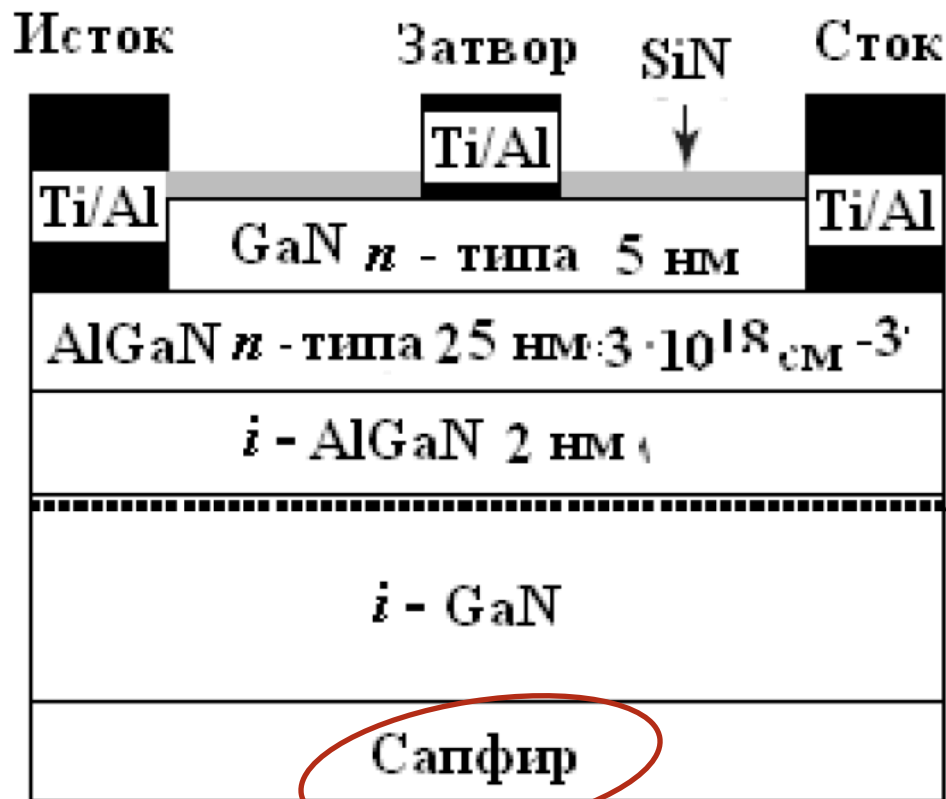


Рабочая частота → 400 ГГц (в настоящее время – 200 ГГц)

# рНЕМТ : индий рулит

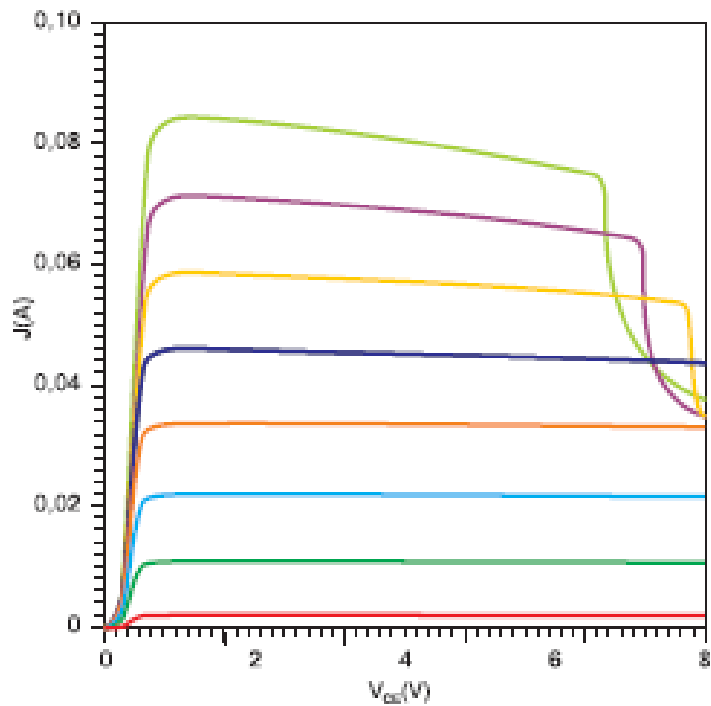
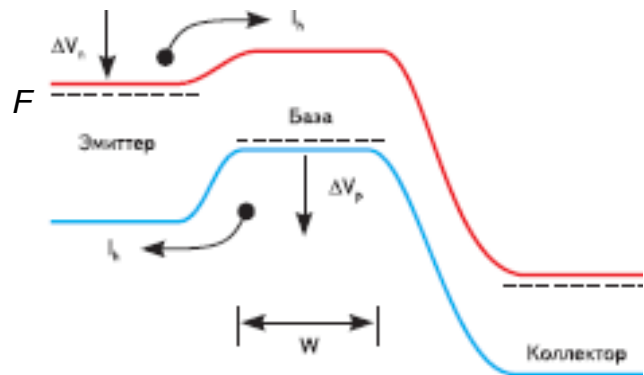
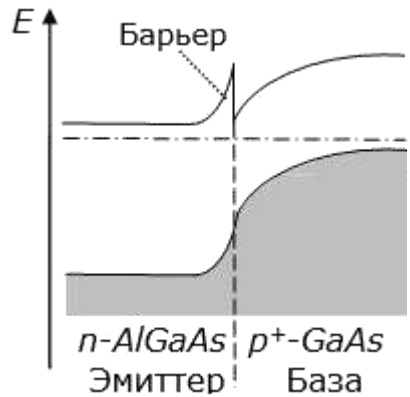


# HEMT GaN:



Рабочая температура  $\rightarrow 600 \text{ }^\circ\text{C}$

# Биполярный транзистор с гетеропереходом (НВТ):

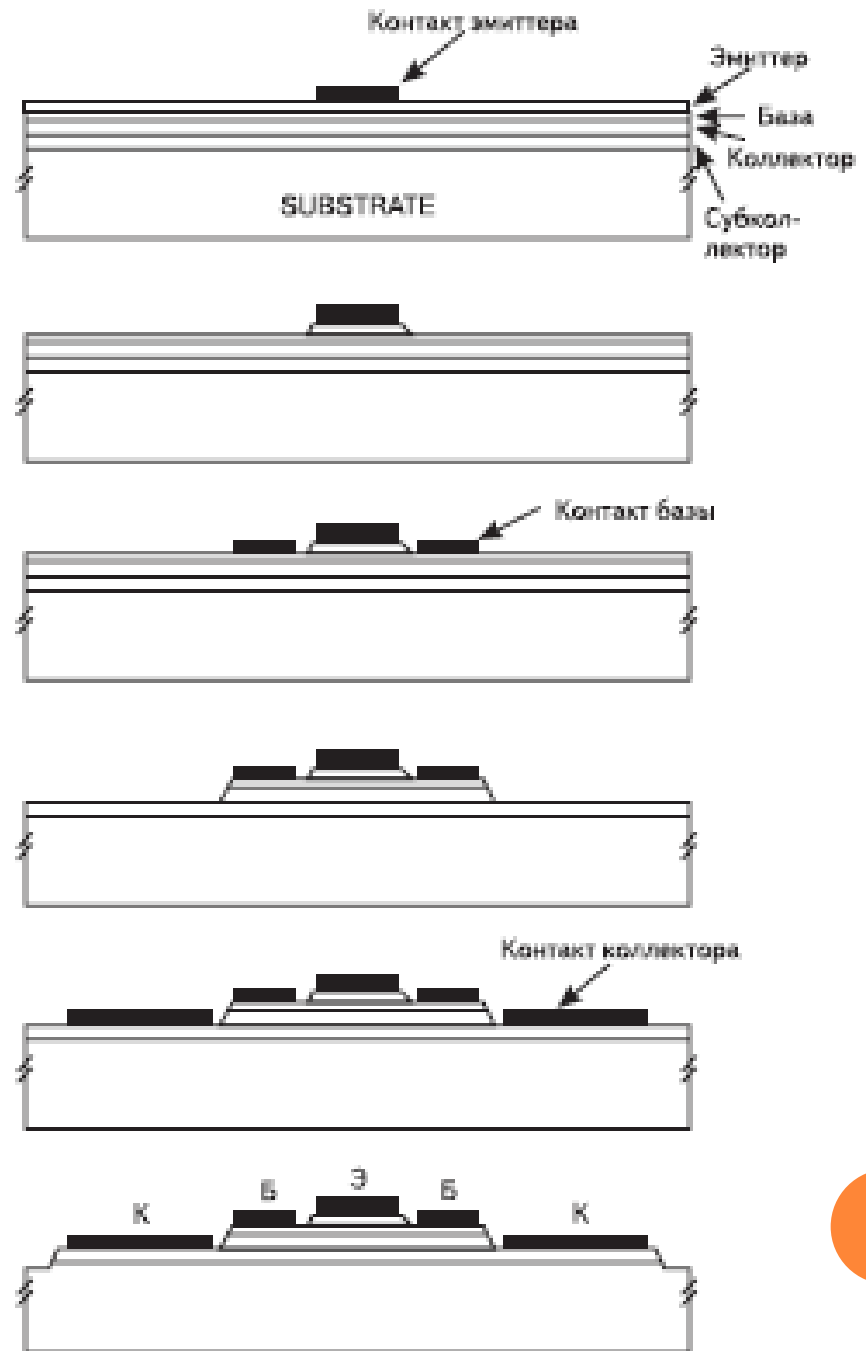


Рабочая частота → 100 ГГц

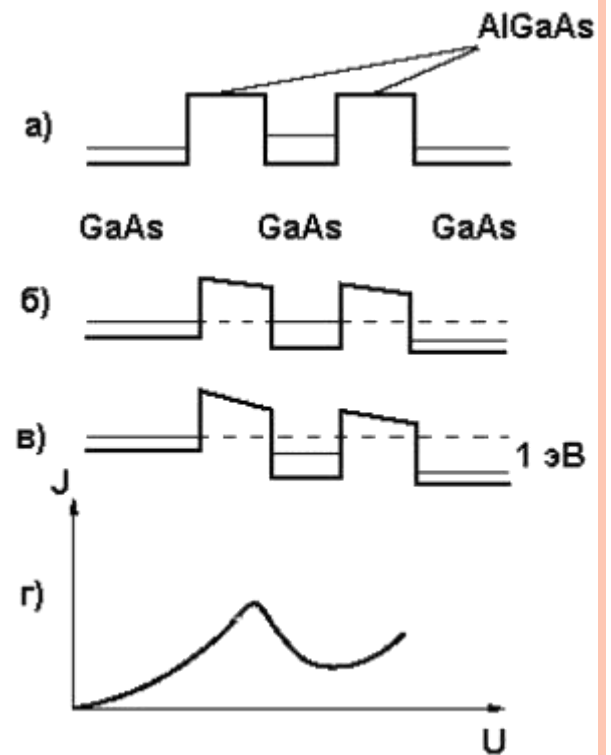
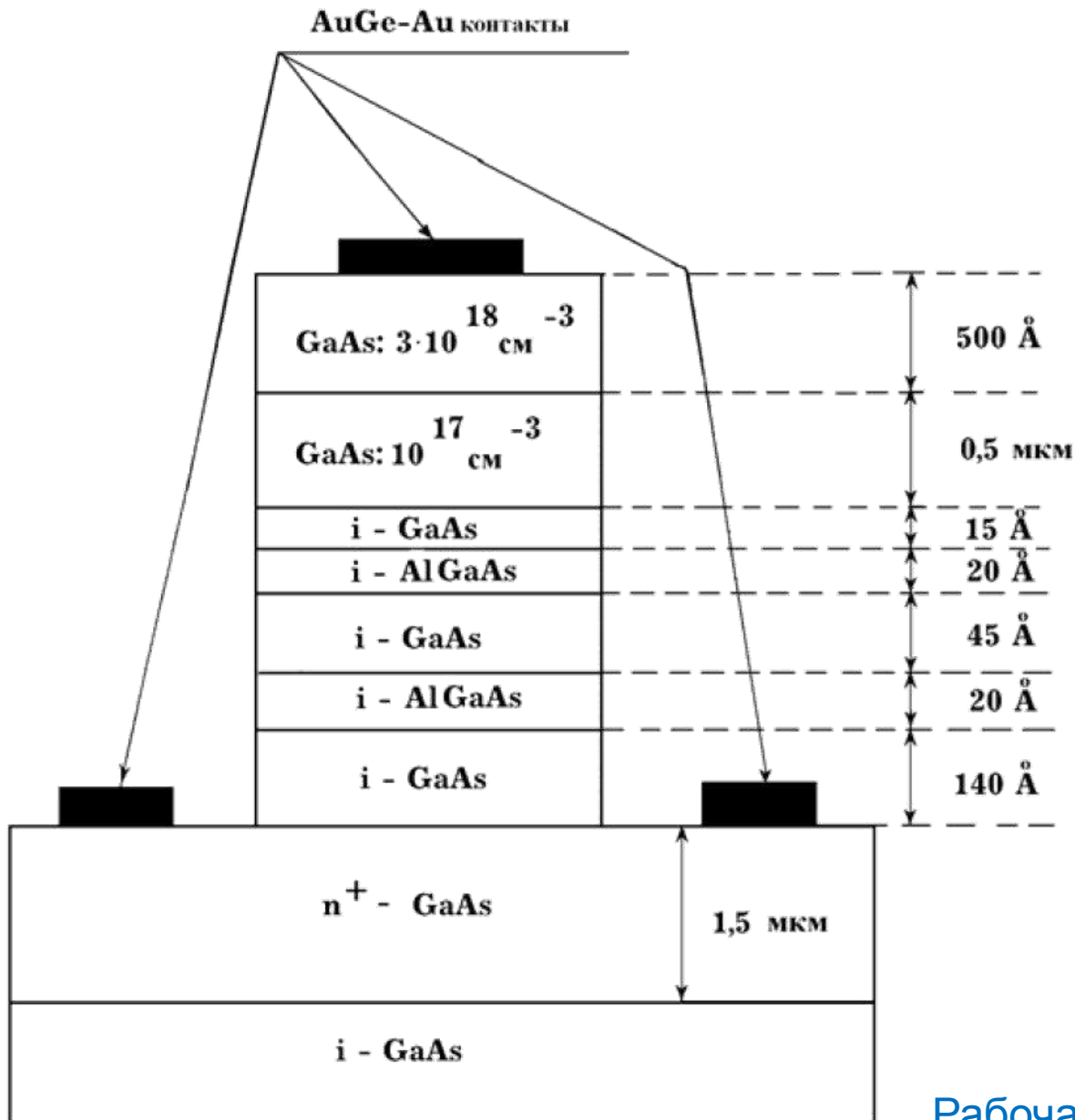


# Типовая технология производства НВТ

- 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.

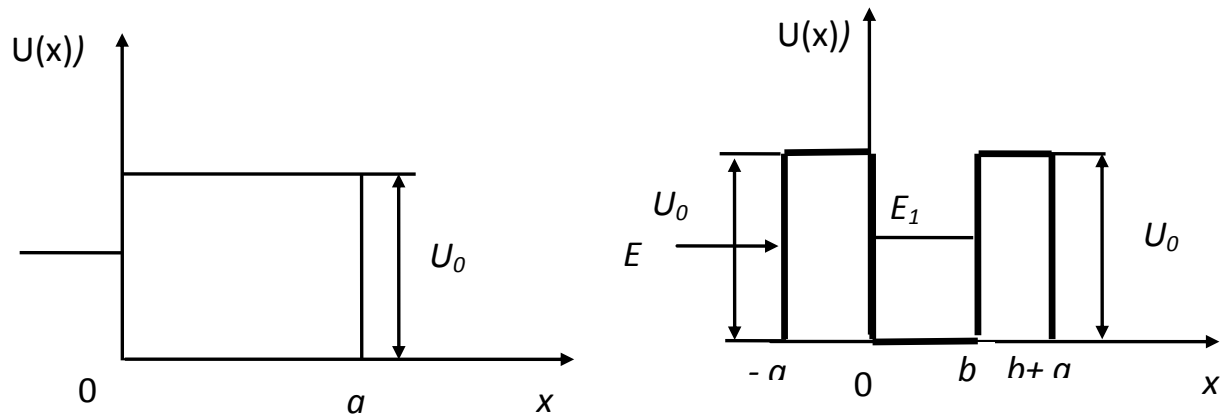


# Резонансно-туннельный диод



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:  $\psi(x) = C \exp(i \frac{p}{\hbar} x)$

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

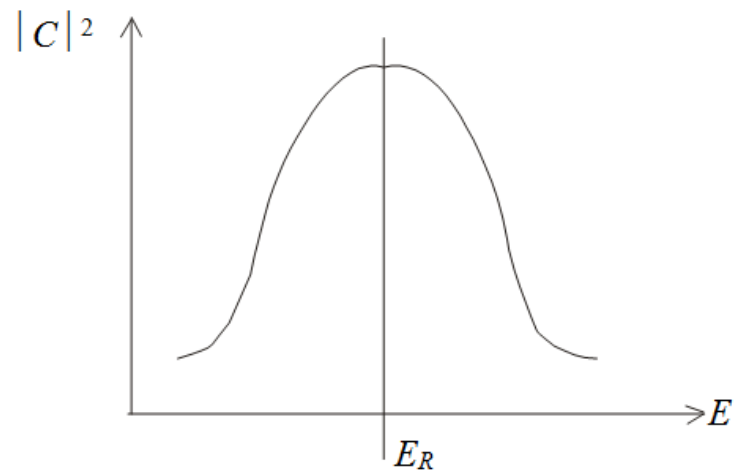
Число электронов  $N$  в потенциальной яме определяется из уравнения:

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

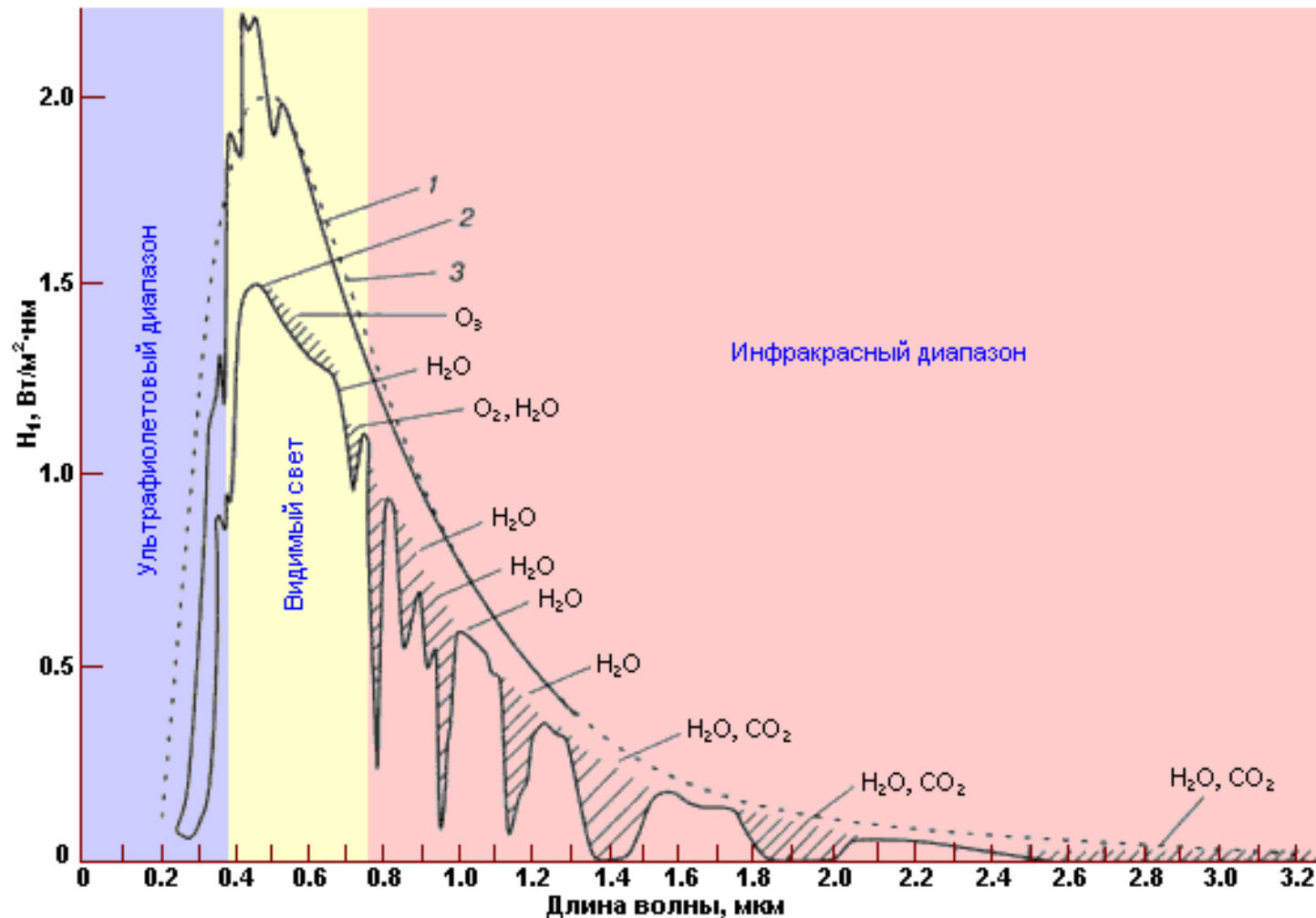
$$N_0 = \frac{\gamma \cdot q^2 \hbar}{(E - E_R)^2 + \gamma^2}$$

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:

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

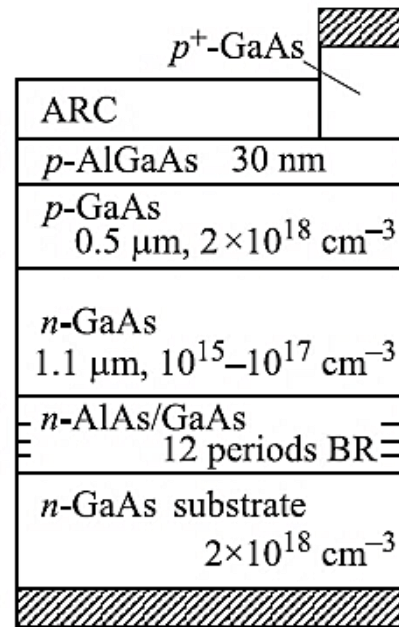
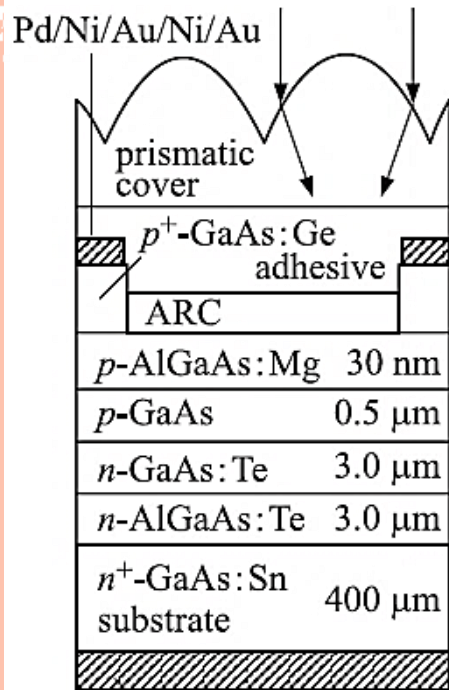
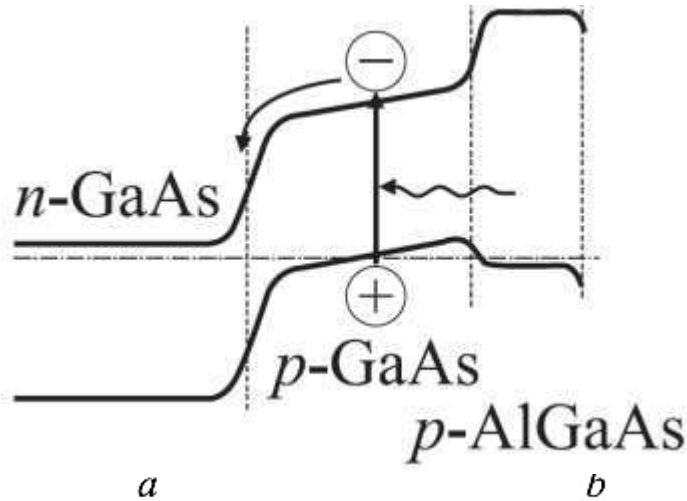


# Солнечные элементы



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



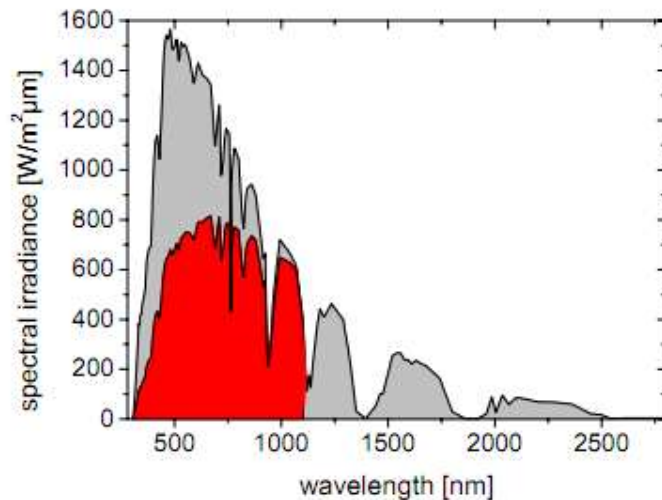
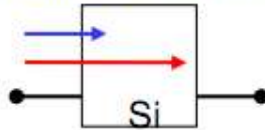
Прогресс в сфере солнечных элементов на основе GaAs был обусловлен применением метода газофазной эпитаксии из паров металлоорганических соединений. При этом широкозонное окно AlGaAs стало выполнять также функцию третьей составляющей в трёхслойном интерференционном антиотражающем покрытии фотоэлемента (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.

Au: Ge/Ni/Au

# Солнечные элементы GaAs

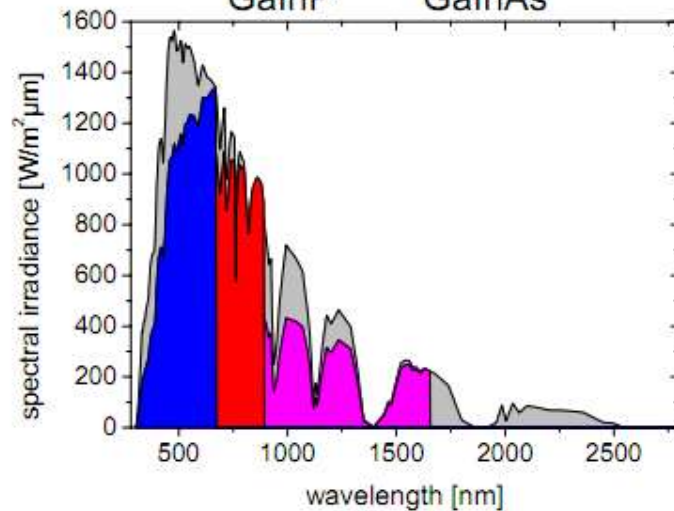
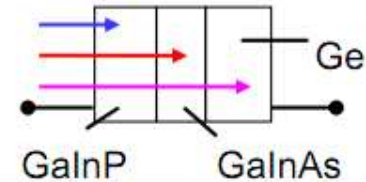
Преимущества каскадных фотоэлектротрансформаторов :  
более эффективное использование энергии солнечного излучения

Кремниевые  
фотопреобразователи с  
одним р-п переходом



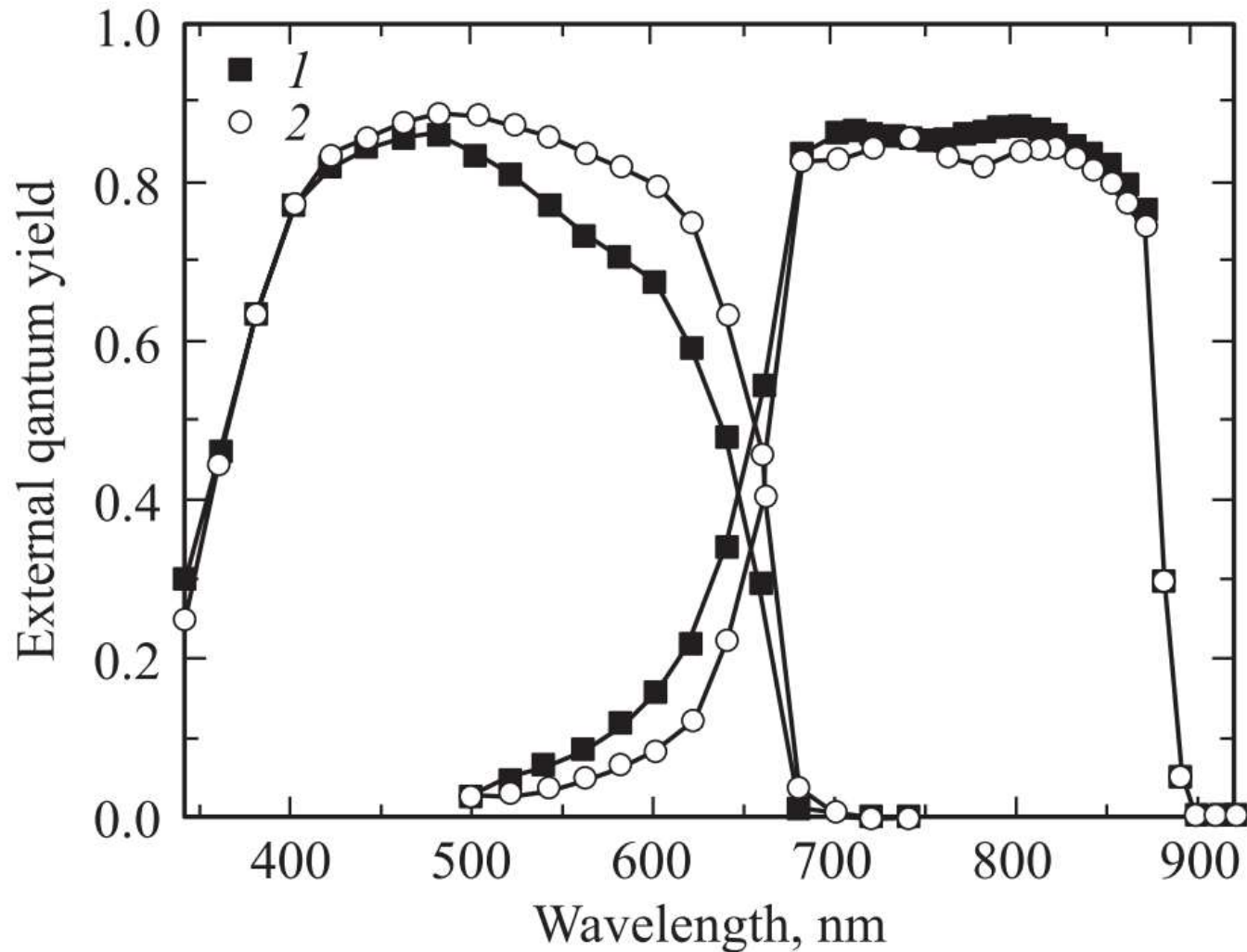
Доля спектра солнечного излучения,  
преобразуемая кремниевыми  
солнечными элементами

Каскадные фотопреобразователи  
на материалах  $A^3B^5$



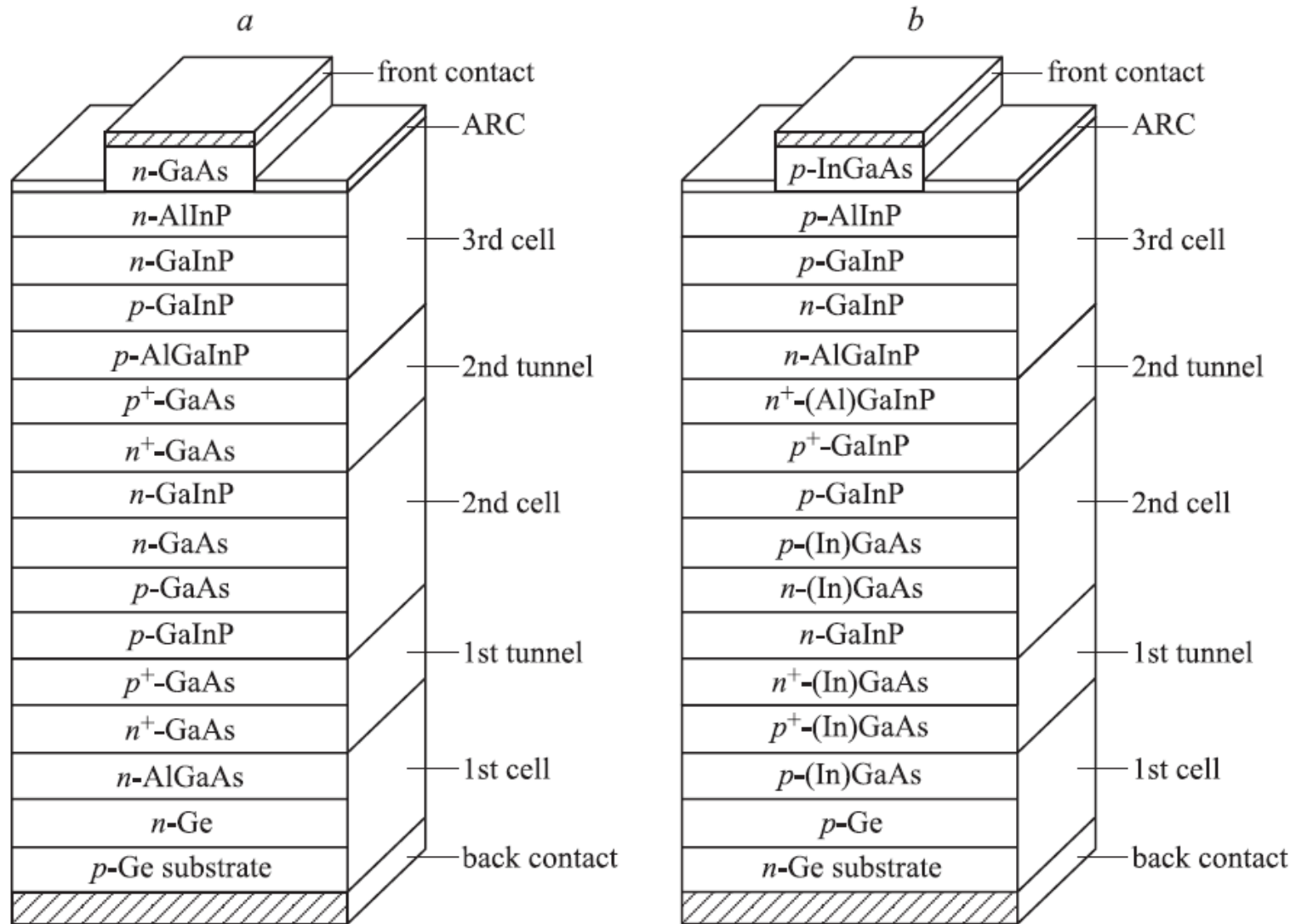
Увеличение доли солнечного спектра,  
преобразуемого каскадным  
фотопреобразователем с тремя р-п  
переходами в материалах GaInP,  
GaInAs и Ge

## Солнечные элементы GaAs



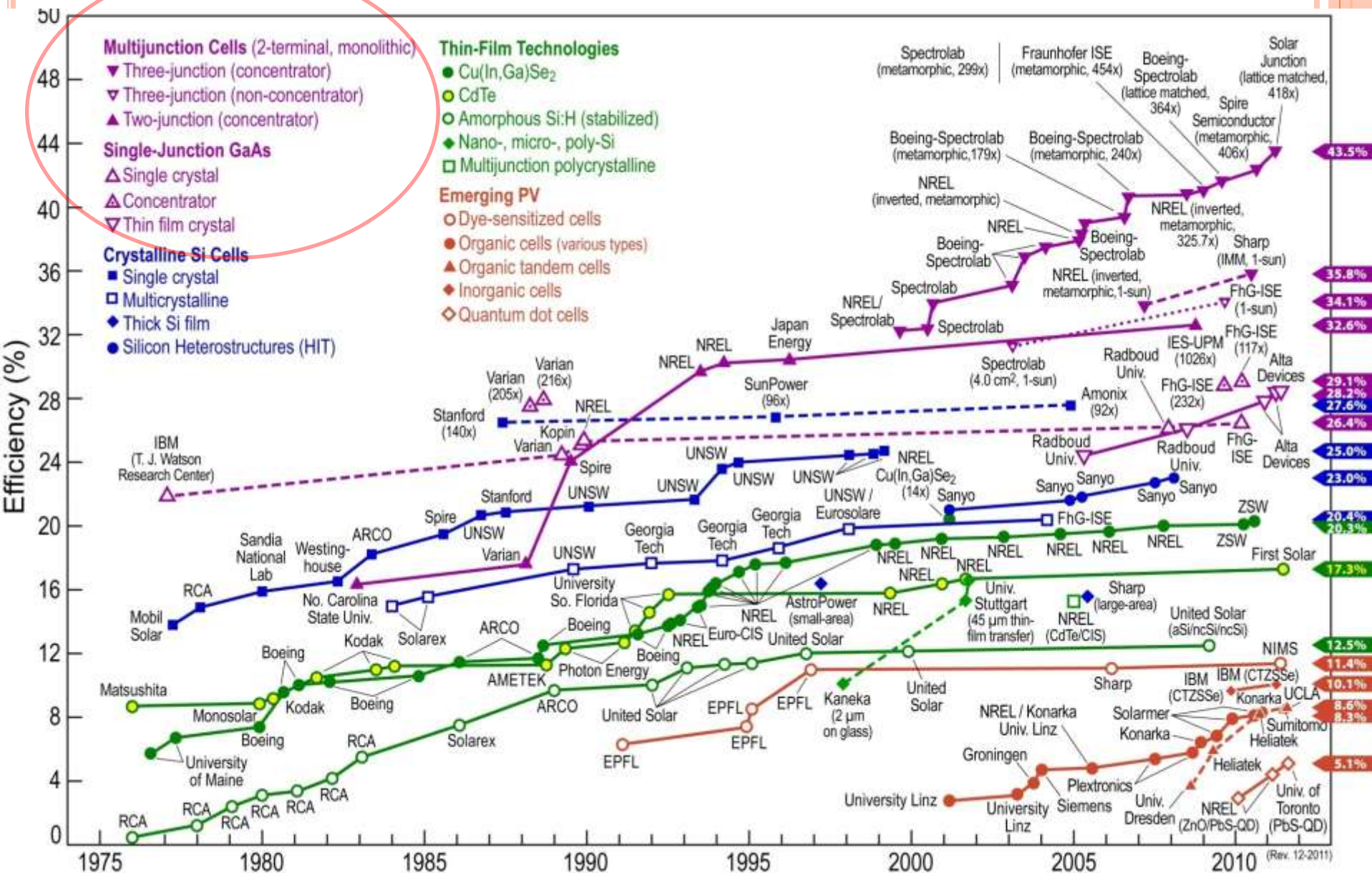
Реальная спектральная зависимость внешнего квантового выхода двухпереходных солнечных элементов GaInP/GaAs, толщина GaInP-элемента: 1 - 450 нм, 2 - 700 нм.

# Солнечные элементы GaAs



Общая толщина многослойной эпитаксиальной структуры не превышает нескольких микрон.

# Солнечные элементы – перспективы использования



aspire invent achieve

