

Литература: Аваев Н.А. Шишкин Г.Г. Электронные приборы. М.МАИ.1996г.

Электронные приборы, под редакцией Шишкина Г.Г. М. Энергоатомиздат. 1989г.

Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. М. Высшая школа, 1987г.

Андрушко Л.М., Фёдоров Н.Д. Электронные и квантовые приборы СВЧ. М.РиС.1981г.

Панфилов И.П. Приборы СВЧ и оптического диапазонов. М. РиС (Радио и связь)1993г.

Дулин В.Н. Электронные и квантовые приборы СВЧ. М. Энергия 1972г.

Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника, под ред. Фёдорова Н.Д. М. РиС. 2002г.

Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника. М. Высшая школа.1991г.

Электронные приборы – это устройства, работа которых основана на использовании электрических, оптических и акустических явлений. Рабочей средой может быть твёрдое тело (полупроводники, твёрдотельные лазеры), вакуум (электронные лампы, кинескопы), газ (неоновые лампы), плазма (газовые лазеры, люминесцентные лампы).

Функции электронных приборов (ЭП):

1. Преобразование информационных сигналов – это усиление, передача, изменение их параметров;
2. Преобразование энергии – световой, тепловой, механической в электрическую энергию и преобразование переменного тока в постоянный ток и обратно.

Классификация электронных приборов (ЭП) по:

1. назначению (усилительные, генераторные, преобразовательные и т.д.)
2. физическим свойствам,
3. электрическим параметрам,
4. конструктивно- технологическим признакам,
5. видам рабочей среды и т.д..

В зависимости от вида сигналов и способа обработки информации ЭП делятся на:

- электропреобразовательные – это самая большая группа ЭП.
- электросветовые: светодиоды, индикаторы, кинескопы...
- фотоэлектрические: фотодиоды, фототранзисторы, солнечные батареи...
- термоэлектрические: термисторы, термогенераторы...
- акустоэлектрические и т.д...

По назначению и выполняемой функции ЭП приборы делятся на выпрямительные; усилительные; генераторные; переключательные; преобразовательные; индикаторные и т.д...

По диапазону рабочих частот – низкочастотные (НЧ), высокочастотные (ВЧ), сверхвысокочастотные (СВЧ) и оптические ЭП.

По допустимой мощности: малая; средняя; большая (или мощные ЭП).

### Основные понятия о режимах и параметрах ЭП.

Совокупность условий определяющих работу ЭП – называют рабочим **режимом** электронного прибора.

Режим работы соответствующий требованиям нормативной документации для данного ЭП – называют **типовым**.

Любой режим определяется совокупностью величин, которые называют **рабочими параметрами** ЭП.

Параметрами ЭП являются величины относящиеся к:

1. электрическому режиму – это значения напряжений на электродах ЭП и токи в их цепях;
2. механическому режиму – это совокупность механических воздействий на работающий ЭП –
  - ускорение, удары, тряска, давление;
3. климатическому режиму – температура, влажность, пыль, газ, агрессивная среда, радиация.

Режимы ЭП определяющие их длительные условия работы – называются **номинальными**.

Параметрами так же являются физические величины, которые характеризуют такие свойства ЭП как коэффициент усиления, внутреннее сопротивление, междueleктродные ёмкости, индуктивности выводов ит.д..

Режимы, при превышении значений которых возможны необратимые изменения в ЭП – называются **предельными режимами** или **предельными параметрами**.

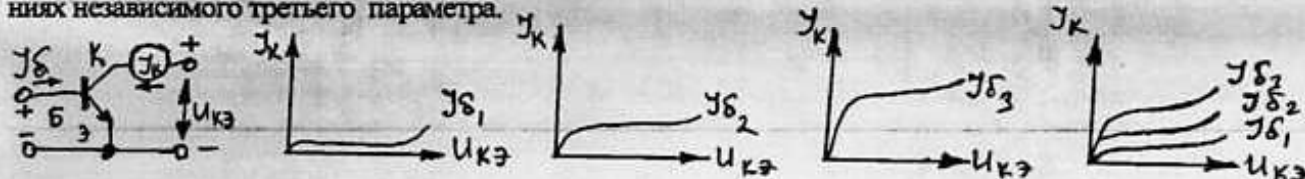
Режим работы электронного прибора может быть статическим и динамическим.

**Статическим** - называется режим, при котором на электроды ЭП поданы постоянные напряжения.

**Динамическим** – называется режим, при котором хотя бы на одном из электродов электронного прибора напряжение меняется во времени.

**Характеристикой** электронного прибора называют величину зависимости какого-либо параметра принимаемого в качестве функции от другого параметра принимаемого в качестве аргумента, при том условии, что все остальные параметры остаются неизменными.

**Семейством характеристик** называют совокупность характеристик при различных фиксированных значениях независимого третьего параметра.



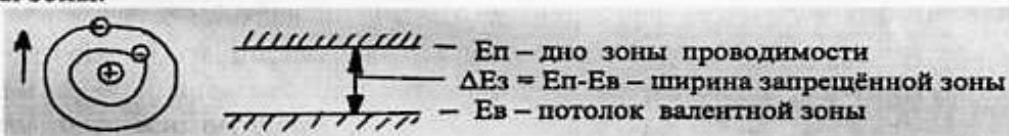
Важнейшими характеристиками электронных приборов являются – **статические** – отображающие зависимость тока в цепи какого-либо электрода от напряжения на любом другом электроде в статическом режиме. Часто названия статических характеристик связывают с названиями электродов – анодные, стоковые, коллекторные, сеточные и т.д..

Существуют так же семейства входных, выходных, передаточных характеристик.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

(свойства полупроводниковых материалов)

В кристаллическом твёрдом теле существуют так называемые квазинепрерывные зоны разрешенных значений энергий электронов, и в зависимости от величины энергии, которой обладает электрон, он занимает ту или иную зону. Существуют две разрешенные и одна запрещённая зоны.



**Ев** – верхняя разрешенная зона, которая при температуре абсолютного нуля ( $T = 0^\circ\text{K}$ ) целиком заполнена электронами называется – **валентной**.

Расположенная над ней следующая разрешенная зона (при  $T = 0^\circ\text{K}$  - пуста или частично заполнена электронами) – называется **зоной проводимости** – **Еп**.

В чистых полупроводниках (ПП) и диэлектриках при  $T^0 = 0^\circ\text{K}$  **Еп** – пуста и электропроводность отсутствует так как нет свободных электронов –  $e^-$ . При  $T^0 > 0^\circ\text{K}$  – электрон из зоны **Ев** переходит в зону **Еп**, а в зоне **Ев** появляются незанятые уровни энергии (столько уровней, сколько ушло электронов).

заряд электрона  $= 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл (Кулон).

постоянная Планка  $h = 4,1 \cdot 10^{-15}$  эВ · сек  $= [6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж · сек].

где  $\nu$  - частота, а  $h\nu$  – энергия тепловых колебаний атома.

Твердые тела:	проводники	запрещённой зоны нет	проводимость ↑
	полупроводники	$E_z < 3$ эВ	
	диэлектрики	$E_z > 3$ эВ	

Если  $h\nu > E_z$  – то образуется электронно-дырочная пара с поглощением  $h\nu$  - при этом появляются положительно и отрицательно заряженные свободные носители.

Процесс одновременного образования свободных отрицательно заряженных носителей – **электронов** и положительно заряженных носителей – **дырок** под действием тепловых колебаний атомов называется **генерацией электронно-дырочных пар**. Обратный процесс называется **рекомбинацией электронно-дырочных пар**. При процессе рекомбинации электроны из зоны проводимости переходят в валентную зону, занимают незанятые энергетические уровни и исчезают как свободные носители.

При отсутствии внешних воздействий в материале устанавливается **равновесная концентрация** электронов и дырок.

Существует понятие – **эффективная масса** – совпадающая с массой электрона в вакууме.

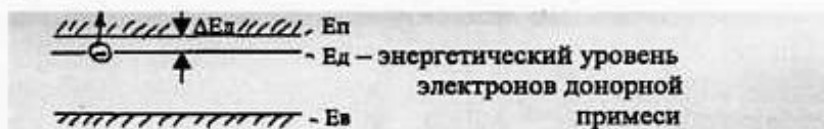
$m_n$  - эффективная масса электрона,  $m_p$  - эффективная масса дырки.  $m_p \approx m_n$ .

## ПРИМЕСИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

В обычном полупроводнике концентрации носителей примерно равны –  $n \approx p$ . При введении примесей, атомы этих примесей образуют в запрещённой зоне разрешенные уровни. Примеси бывают **донорные** и **акцепторные**.

1. При введении в собственный (чистый) полупроводник **донорной** примеси – число свободных электронов будет превышать число дырок.

Донорные примеси образуют в запрещённой зоне разрешенные уровни вблизи дна зоны проводимости.



При ионизации донорного атома электрон уходит с донорного уровня в зону проводимости.  $\Delta E_d = E_c - E_d$  – называется энергией ионизации донора.  $\Delta E_d \ll \Delta E_z$ . При температуре  $T = 300^\circ\text{K}$  полупроводник имеет проводимость  $n$  – типа (электронная) где основным носителем является электрон –  $e^-$ .

2. **Акцепторная примесь.** При большой концентрации акцепторной примеси в полупроводнике будет преобладать дырочная проводимость.



$E_a$  – энергетический уровень электронов акцепторной примеси. Электрон уходит на акцепторный уровень  $E_a$  – при этом в валентной зоне образуется “дырка”.

$\Delta E_a$  – это величина энергии ионизации акцепторов.

При температуре  $T = 300^\circ\text{K}$  полупроводник имеет проводимость  $p$  – типа (дырочная) – дырки в этом случае являются основными носителями.

Современные технологии обеспечивают концентрацию примесей доноров или акцепторов –  $N$  в пределах  $10^{13} \div 10^{21} \text{ см}^{-3}$ . При концентрациях примесей более чем  $10^{19} \text{ см}^{-3}$  полупроводник называется **вырожденным**. На практике в полупроводниках часто присутствуют как донорные так и акцепторные примеси, но в разных концентрациях.

### Концентрация носителей в полупроводниках.

В чистом (собственном) полупроводнике  $n_i = p_i = \sqrt{N_p \cdot N_v} \cdot \exp(-\Delta E_z / kT)$ . (см. Л. Росадо)  
 $n_i = n = p$  – концентрация носителей в  $\text{см}^{-3}$  ( $1/\text{см}^3$ ),

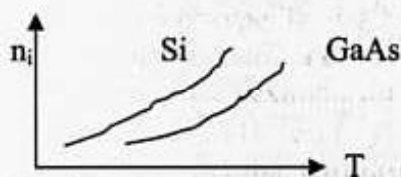
$N_p, N_v$  – концентрации электрических разрешенных состояний (уровней) в полосе энергий  $kT$  в зоне проводимости и валентной зоне,

$\exp$  – множитель обуславливающий резкое увеличение концентрации  $n_i$  при росте температуры  $T$  или уменьшении ширины запрещённой зоны  $\Delta E_z$

$\Delta E_z$  – ширина запрещенной зоны,

$kT$  – средняя энергия тепловых колебаний атомов.

$k$  – постоянная Больцмана,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$   $K$  – температура в градусах Кельвина.



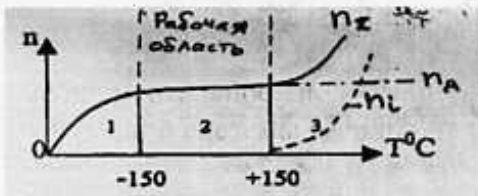
для Si  $\Delta E_z = 1,12 \text{ эВ}$  (при  $T = 300^\circ\text{K}$ )

для GaAs  $\Delta E_z = 1,42 \text{ эВ}$ ; для Ge  $\Delta E_z = 0,72 \text{ эВ}$

График зависимости величины концентрации носителей  $n_i$  от температуры.



## Концентрация носителей в примесном ПП.



- график зависимости концентрации основных носителей для Si – p – типа. В рабочей области концентрация этих носителей не зависит от температуры.

1-я область – температура мала, примесь ионизирована не вся  $n < N_d$ , концентрация свободных электронов мала.

$n$  – концентрация носителей (т.е. электронов);  $N_d$  – концентрация атомов доноров.

$kT < \Delta E_d$   $kT$  – средняя энергия тепловых колебаний атомов,

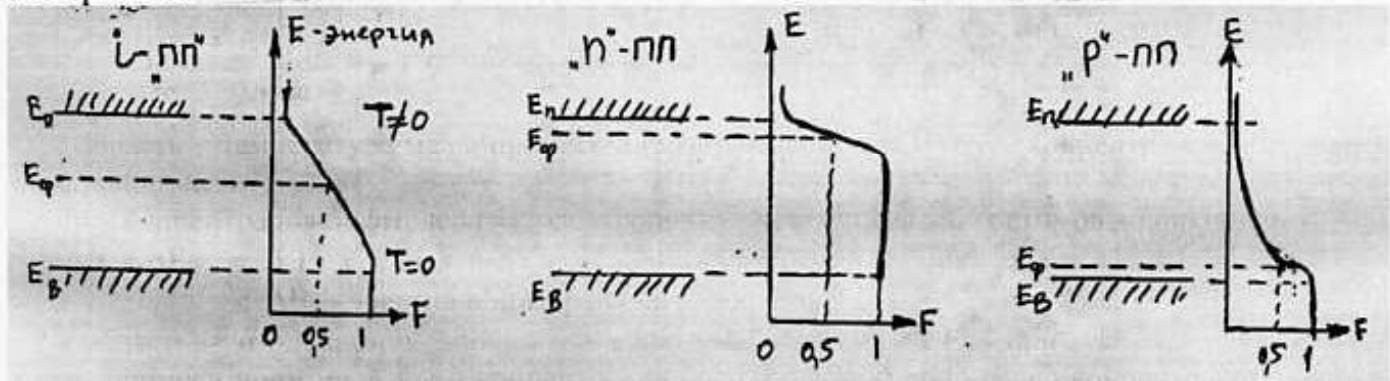
$\Delta E_d$  – энергия ионизированных доноров.

2-я область – это диапазон рабочих температур  $kT \approx$ , но  $kT < \Delta E_d$ , – при этих температурах все атомы примеси ионизированы и концентрация носителей примерно равна концентрации доноров  $n \approx N_d$ .

3-я область – температура велика –  $kT > \Delta E_d$  – преобладает проводимость чистого полупроводника т.е.  $n_i \gg n \approx N_d$ , где  $n_i$  общая концентрация носителей,  $n$  – концентрация электронов,  $N_d$  – концентрация атомов доноров.

## Уровень Ферми.

$E_F$  – это энергетический уровень, ниже которого большинство разрешенных уровней заполнены электронами.

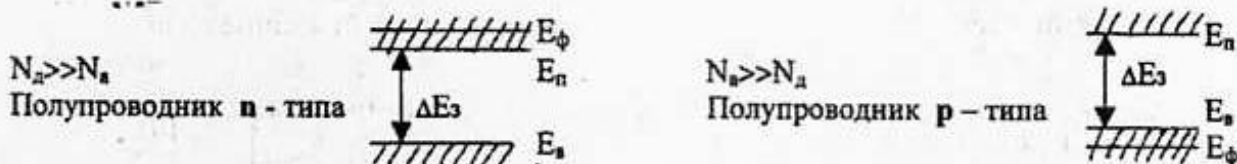


$F$  – вероятность заполнения электронами какого-то энергетического уровня с энергией  $E$  дается функцией распределения Ферми-Дирака, где  $E_F$  – параметр называемый уровнем Ферми.

$$F_e = \{ \exp[(E - E_F)/kT] + 1 \}^{-1} = 1 / [1 + \exp(E - E_F)/kT]$$

где  $kT$  – средняя энергия колебаний атома.

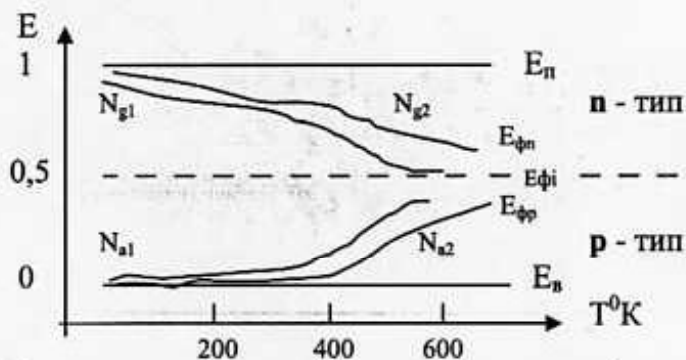
Положение уровня Ферми у вырожденных полупроводников с концентрацией атомов примеси  $N > 10^{19} \text{ см}^{-3}$ :



Таким образом у вырожденных полупроводников уровень Ферми оказывается для  $n$  – типа в зоне проводимости, а для  $p$  – типа в валентной зоне.

## Зависимость уровня Ферми от температуры.

Фундаментальное положение физики твёрдых тел: Уровень Ферми постоянен во всех частях разнородной системы твердых тел находящейся в равновесии.



$E_{fn}$  – уровень Ферми в *n* – полупроводнике (невырожденном)

$E_{fp}$  – уровень Ферми в *p* – полупроводнике (невырожденном)

$E_{fi}$  – уровень Ферми в *i* – полупроводнике

$N_{d1} \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$        $N_{d2} \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$

$N_{a1} \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$        $N_{a2} \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$

### Дрейфовое и диффузионное движения носителей

Дрейф и диффузия – разновидности направленного движения носителей в полупроводнике (т.е. свободных носителей заряда). При отсутствии внешнего воздействия на полупроводник (т.е. отсутствия электрического поля) носители движутся хаотически со средней скоростью теплового движения  $\bar{V}_T = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$ , где  $\bar{V}_T$  – средняя скорость теплового движения,

$k$  – постоянная Больцмана =  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ [Дж/К}^0\text{]}$

$T$  – температура в градусах Кельвина

$m$  – эффективная масса носителя,

$kT$  – средняя энергия тепловых колебаний атома.

Средняя длина свободного пробега носителей:

$\bar{L} = \bar{V}_T \cdot \bar{t}_n$ , где  $\bar{t}_n$  – среднее время свободного пробега (индекс-*n*) носителей. При хаотическом движении направления векторов скоростей равновероятны и электрический ток равен нулю.

Движение носителей под действием внешнего электрического поля – называется дрейфовым.

$\bar{V}_{др} = \bar{t}_n \cdot q \cdot E/m = \mu \cdot E$  – где  $\mu \text{ [см}^2\text{/В} \cdot \text{с]}$  – коэффициент определяющий среднюю подвижность носителей – это основной параметр дрейфового движения.

$m$  – эффективная масса свободных носителей

$q$  – величина заряда

$E$  – напряженность электрического поля – (Вольт/метр)

Например подвижность носителей в кремнии:  $\mu_n(\text{Si}) \approx 3\mu_p(\text{Si})$ . Сравнительная подвижность электронов в разных материалах:  $\mu_n(\text{GaAs}) \approx 5,7 \mu_n(\text{Si})$ .

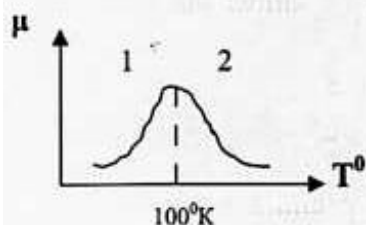


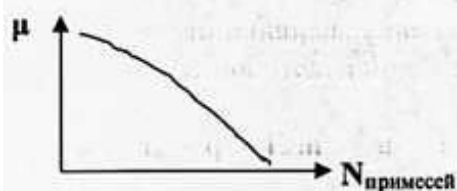
График зависимости  $\mu$  от температуры.

1 –  $T^0 \rightarrow 0$  – мала скорость электронов и велико «кулоновское трение».

2 –  $T^0 > 150^\circ\text{K}$  – увеличиваются колебания атомов в кристаллической решетке и растёт вероятность попадания электрона в атом.

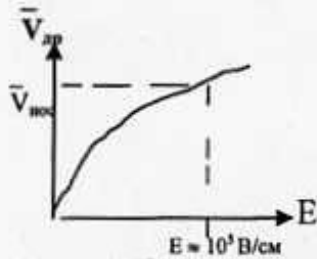
При этом уменьшается  $\bar{L}$  – длина свободного пробега  $e^-$ .

График зависимости  $\mu$  от концентрации примесей:



при увеличении концентрации примесей –  $N_{пр}$  – увеличивается рассеяние на атомах примеси.

График зависимости средней скорости дрейфа носителей от величины напряженности поля:



при  $T = 300^{\circ}\text{K}$   $\bar{V}_{\text{нос}} \approx \bar{V}_T$  т.е. средняя скорость носителей примерно равна величине средней тепловой скорости.

Суммарная плотность дрейфового тока:

$$I_{\text{др}} = (q n \mu_n E + q p \mu_p E) [\text{A}/\text{см}^2], \text{ где } (q n \mu_n E) = I_{n, \text{др}} -$$

плотность тока электронов, а  $(q p \mu_p E) = I_{p, \text{др}}$  – плотность тока дырок.

$V_{\text{нос}} \approx 10^7 \text{ см/сек}$ ;  $\mu$  – подвижность;  $I$  – ток;  $q$  – заряд.

Величина элементарного заряда  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$

Движение носителей в объёме полупроводника в сторону их меньшей концентрации называется **диффузионным**.

Плотность потока носителей при этом –  $\Pi = -D_n \frac{dn}{dx}$  (для электронов в направлении  $x$ ), где  $D_n [\text{см}^2/\text{с}]$  – коэффициент диффузии электронов. Плотность диффузионного тока:

$$I_{\text{дифф}} = (q D_n \frac{dn}{dx} + q D_p \frac{dp}{dx}) [\text{A}/\text{см}^2], \text{ где } q D_n \frac{dn}{dx} - \text{плотность тока электронов, а } q D_p \frac{dp}{dx} - \text{плотность тока дырок.}$$

Соотношение дрейфового диффузионного движений:  $D_n = \varphi_T \mu_n = (kT/q) \mu_n$

$$D_p = \varphi_T \mu_p = (kT/q) \mu_p$$

$\varphi_T = kT/q$  – тепловой потенциал – его размерность – **вольт** [при  $300^{\circ}\text{K}$   $\varphi_T \approx 26 \text{ мВ}$  (милливольт)]

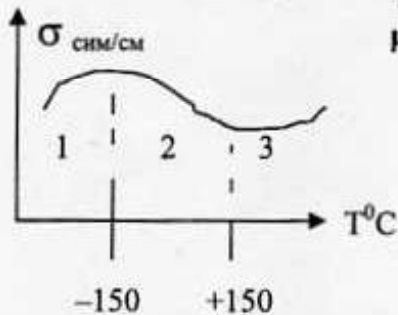
$\mu$  – подвижность;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура в  $\text{K}^{\circ}$ ;  $kT$  – средняя энергия.

### Электропроводность полупроводников.

Удельная электропроводность ПП:  $\sigma_{\text{сим/см}} = q (n \mu_n + p \mu_p) = 1/R$

$n(T)$  и  $p(T)$  – концентрация носителей в зависимости от температуры,

$\mu(T)$  – величина зависимости подвижности носителей от температуры



1 – при  $T^{\circ} \rightarrow 0$  – мало примесных носителей

2 –  $n$  ( $p$ ) – концентрации носителей постоянны, но уменьшаются их подвижность  $\mu_n$  ( $\mu_p$ )

3 – при больших температурах преобладает собственная проводимость.

	Si	GaAs	Ge
$\mu_n \text{ см}^2/\text{В с}$	1500	8500	3900
$\mu_p \text{ см}^2/\text{В с}$	450	400	1900
$\rho \text{ Ом/см}$	$2,3 \cdot 10^5$	$10^8$	47

Удельная проводимость полупроводников  
где  $E$  – напряженность электрического поля.

$\sigma = i_{\text{др}}/E$ , а с учётом  $\bar{I}_{\text{др}} = q(n\mu_n + p\mu_p)E$   
 $\rho \text{ Ом/см}$  – удельное сопротивление.

### Равновесные и неравновесные носители.

**Равновесными** называются носители, появление которых обусловлено термодинамическим состоянием полупроводника (т.е. его температурой).

**Неравновесными** называются носители, появление которых не связано с температурой ПП.

Основные механизмы генерации неравновесных носителей:

1. **инжекция** (впрыск) носителей в данную область полупроводника из соседней области,
2. **ударная ионизация** – происходит при воздействии на ПП сильного электрического поля,
3. **внешнее электромагнитное излучение** – поглощение энергии которого приводит к разрывам валентных связей в полупроводнике.