



Фотоприёмники

Определение

● **Фотоприёмники**- полупроводниковые приборы, регистрирующие оптическое излучение и преобразующие оптический сигнал на входе в электрический сигнал на выходе фотодетектора.

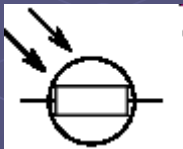
Основные фотоприемники:

- 1) Фоторезисторы
- 2) Фотодиоды
- 3) Фототранзисторы
- 4) ФПЗС

Фоторезисторы

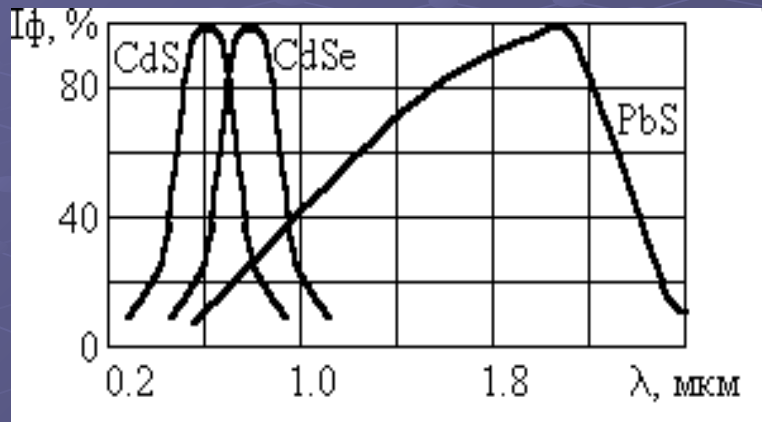
Это п/пр устройства изменяющие своё электрическое сопротивление под действием оптического излучения.

При освещении фоторезистора возрастает концентрация основных носителей в п/пр, и как следствие этого возрастает величина удельной проводимости.

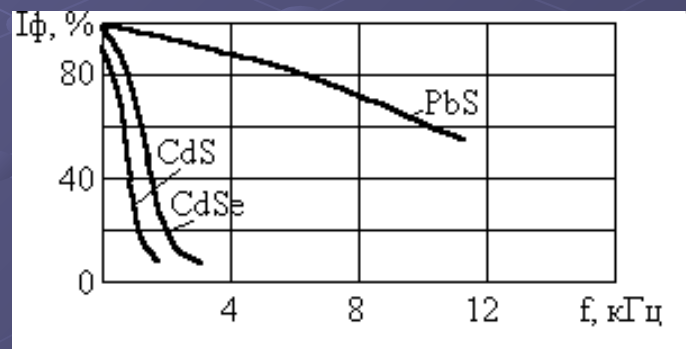


$$\Delta\sigma_0 = q(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p) = q\Delta p\mu_p(1 + b),$$

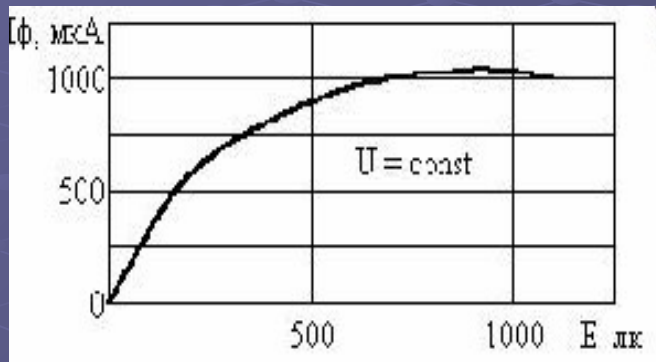
Спектральные характеристики фоторезистора



Частотные характеристики фоторезистора



Световая характеристика фоторезистора



Для фоторезисторов характерны стабильность фотоэлектрических характеристик во времени, малая инерционность, простота устройства, допускающая различные конструктивно-технологические решения. Выбор полупроводникового материала позволяет получить избирательную фоточувствительность. Фоторезисторы на основе CdS и CdSe чувствительны к видимому и УФ-излучению, а фоторезисторы на основе InSb и CdHgTe — к длинноволновому ИК-излучению.

ФОТОДИОДЫ

При попадании кванта света, с энергией $h\nu$ в полосу собственного поглощения в полупроводнике возникает пара неравновесных носителей – электрон и дырка. При регистрации электрического сигнала необходимо зарегистрировать изменение концентрацией носителей. Очевидно, что при прочих равных условиях зарегистрировать изменение концентрации неосновных носителей проще.

Так, например, в N-GaAs с легирующей концентрацией 10^{14} , концентрация основных носителей электронов составляет $10^{14}(\text{см}^{-3})$, а концентрация неосновных носителей – дырок – $1(\text{см}^{-3})$. Поэтому, если при оптическом поглощении в фотоприемнике на основе GaAs возникает 10^{10} неравновесных носителей, то проще зарегистрировать изменение концентрации неосновных носителей.

В фотодиодах на основе p-n переходов как раз и реализован принцип регистрации изменения концентрации неосновных носителей под влиянием внешнего излучения.

Особенности:

- простота технологии изготовления и структур
- сочетание высокой фоточувствительности и быстродействия
- малое сопротивление базы
- малая инерционность

Параметры и характеристики

$$S_{i,\Phi_v} = \frac{I_\Phi}{\Phi_v}$$

$$S_{i,E_v} = \frac{I_\Phi}{E_v}$$

— токовая чувствительность по световому потоку

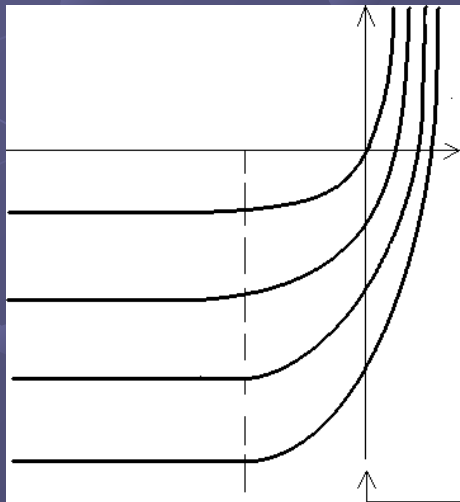
$$S_{u,\Phi_e} = \frac{U_\Phi}{\Phi_e}$$

$$S_{i,E_e} = \frac{U_\Phi}{E_e}$$

— вольтовая чувствительность по энергетическому потоку

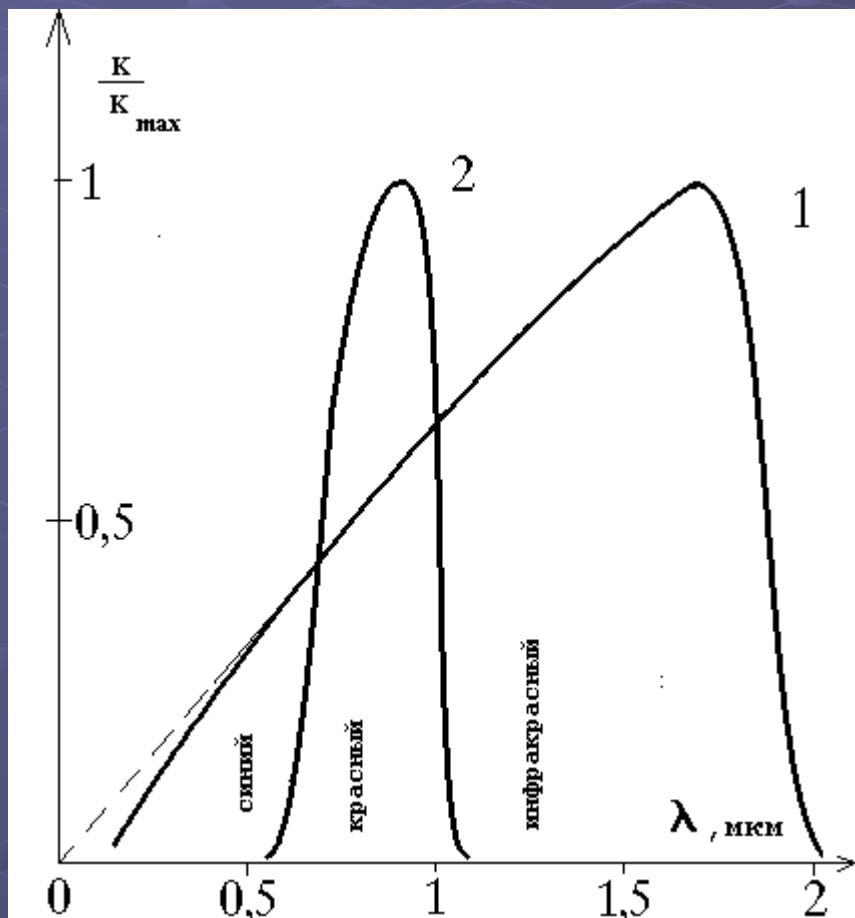
$$I = I_\Phi - I_s \left(e^{\frac{qV_e}{kT}} - 1 \right)$$

— Полный ток в фотодиоде



$$J\Phi = q \eta \alpha L p \Phi.$$

— фототок.



Кривые спектральной чувствительности:
1) германиевого, 2) кремниевого фотодиодов.

Структурная схема фотодиода.

1 — кристалл полупроводника;

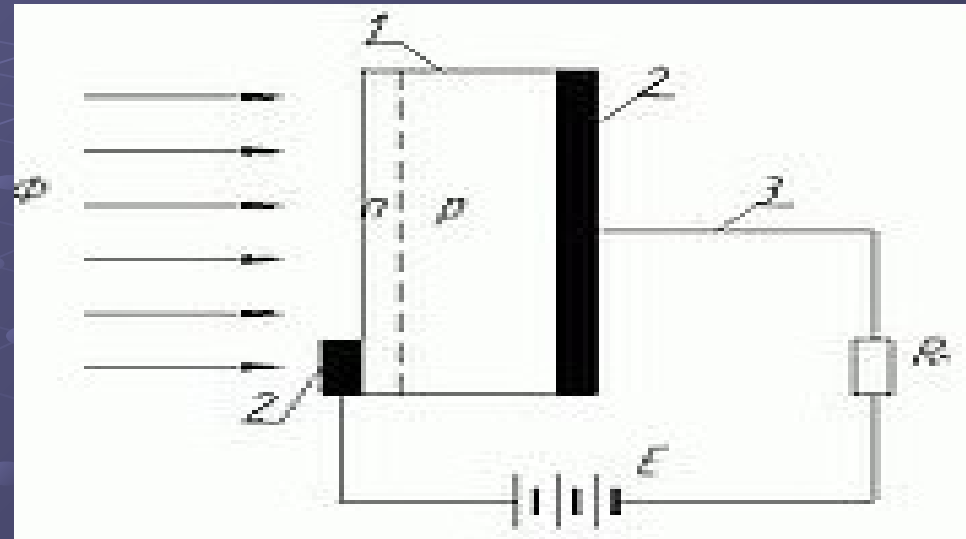
2 — контакты;

3 — выводы;

Φ — поток электромагнитного излучения;

\mathcal{E} — источник постоянного тока;

R_H — нагрузка.



Классификация

● р-і-п фотодиод

В р-і-п структуре средняя і-область заключена между двумя областями противоположной проводимости. При достаточно большом напряжении оно пронизывает і-область, и свободные носители, появившиеся за счет фотонов при облучении, ускоряются электрическим полем р-п переходов. Это дает выигрыш в быстродействии и чувствительности. Повышение быстродействия в р-і-п фотодиоде обусловлено тем, что процесс диффузии заменяется дрейфом электрических зарядов в сильном электрическом поле. Уже при $U_{обр} \approx 0.1V$ р-і-п фотодиод имеет преимущество в быстродействии.

Достоинства:

- 1) есть возможность обеспечения чувствительности в длинноволновой части спектра за счет изменения ширины і-области.
- 2) высокая чувствительность и быстродействие
- 3) малое рабочее напряжение $U_{раб}$

Недостатки:

сложность получения высокой чистоты і-области

● Фотодиод Шоттки (фотодиод с барьером Шоттки)

● Структура металл-полупроводник. При образовании структуры часть электронов перейдет из металла в полупроводник р-типа.

Классификация

Лавинный фотодиод

В структуре используется лавинный пробой. Он возникает тогда, когда энергия фотоносителей превышает энергию образования электронно-дырочных пар. Очень чувствительны. Для оценки существует коэффициент лавинного умножения:

$$M = \frac{I_{\Phi}}{I_{\Phi_0}}$$

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_{pr}}\right)^m}$$

Для реализации лавинного умножения необходимо выполнить два условия:

1) Электрическое поле области пространственного заряда должно быть достаточно большим, чтобы на длине свободного пробега электрон набрал энергию, большую, чем ширина

$$q\lambda = \frac{3I_g}{2} \text{ зоны:}$$

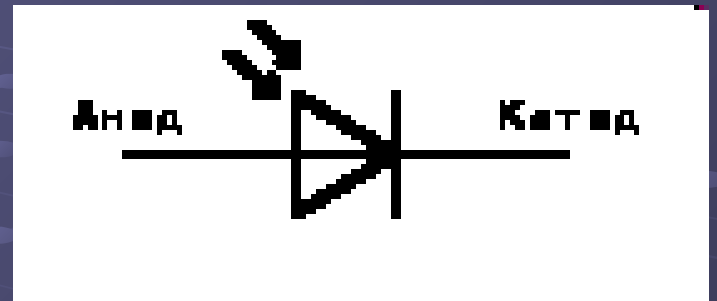
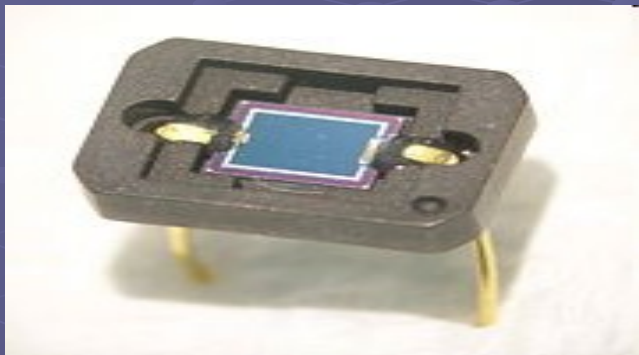
2) Ширина области пространственного заряда должна быть существенно больше, чем длина свободного пробега:

$$W \gg \lambda$$

Значение коэффициентов внутреннего усиления составляет $M=10-100$ в зависимости от типа фотодиодов.

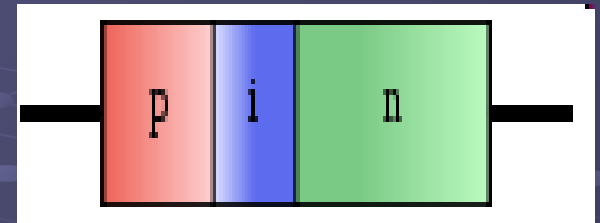
Фотодиод с гетероструктурой

Гетеропереходом называют слой, возникающий на границе двух полупроводников с разной шириной запрещённой зоны. Один слой $p+$ играет роль «приёмного окна». Заряды генерируются в центральной области. За счет подбора полупроводников с различной шириной запрещённой зоны можно перекрыть весь диапазон длин волн. Недостаток — сложность изготовления.



P-i-N-фотодиод

PIN-диод — разновидность диода, в котором между областями электронной (n) и дырочной (p) проводимости находится собственный (нелегированный, англ. intrinsic) полупроводник (i-область). p и n области как правило легируются сильно, так как они часто используются для омического контакта к металлу.



Широкая нелегированная i-область делает pin-диод плохим выпрямителем (обычное применение для диода), но с другой стороны это позволяет использовать его в аттенуаторах (ослабителях сигнала), быстрых переключателях, фотодетекторах, а также в высоковольтной электронике.

Как правило предназначен для работы в сантиметровом диапазоне волн (СВЧ).

Принцип работы

- Характерные качества p-n -диода проявляются при работе в режиме сильной инжекции, когда i -область заполняется носителями заряда из сильнолегированных n^+ и p^+ областей, к которым прикладывается прямое смещение напряжения. p-n -диод функционально можно сравнить с ведром воды с отверстием сбоку — как только ведро наполняется до уровня отверстия — оно начинает протекать. Точно так же и диод начинает пропускать ток, как только заполнится носителями заряда i -область.
- Из-за того, что в i -области очень низкая концентрация носителей заряда, там практически отсутствуют процессы рекомбинации во время инжекции. Но в режиме прямого смещения концентрация носителей заряда на несколько порядков превышает собственную концентрацию

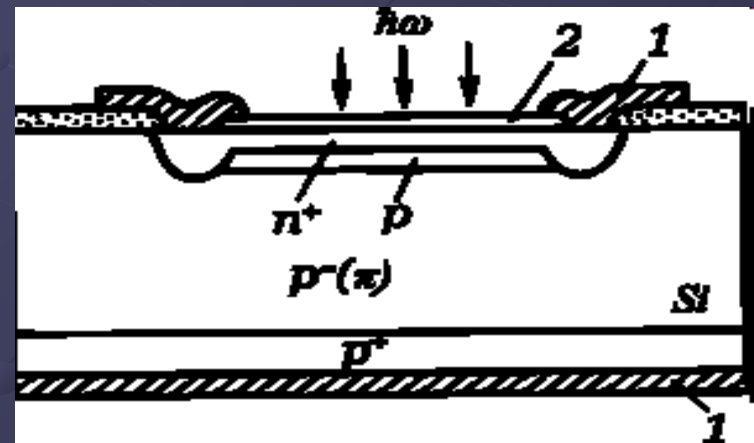
- На низких частотах для рпн-диода справедливы те же уравнения, что и для обычного. На высоких частотах рпн-диод ведет себя как практически идеальный резистор — его вольт-амперная характеристика (ВАХ) линейна даже для очень большого значения напряжения. На высоких частотах в *i*-области находится большое количество накопленного заряда, который позволяет диоду работать. На низких частотах заряд в *i*-области рекомбинирует и диод выключается.
- Высокочастотное сопротивление обратно пропорционально постоянному току, протекающему через рпн-диод. Таким образом, можно варьировать значение сопротивления в широких пределах — от 0.1 Ом до 10КОм — меняя постоянную составляющую тока.
- Большая ширина *i*-области также означает, что рпн-диод имеет небольшую ёмкость при обратном смещении.
- Области пространственного заряда (ОПЗ) в рпн-диодe практически полностью находятся в *i*-области. По сравнению с обычными, рпн-диод имеет значительно большую ОПЗ, границы которой незначительно меняются в зависимости от приложенного обратного напряжения. Таким образом увеличивается объем полупроводника, где могут быть образованы электронно дырочные пары под воздействием излучения (например, оптического — фотона)

Лавинные фотодиоды

- Лавинные фотодиоды, ЛФД (avalanche photodiode (APD)) — это высокочувствительные полупроводниковые приборы, преобразующие свет в электрический сигнал за счёт фотоэффекта. Их можно рассматривать в качестве фотоприёмников, обеспечивающих внутреннее усиление посредством эффекта лавинного умножения. С функциональной точки зрения они являются твердотельными аналогами фотоумножителей. Лавинные фотодиоды обладают большей чувствительностью по сравнению с другими полупроводниковыми фотоприёмниками, что позволяет использовать их для регистрации малых световых мощностей (≈ 1 нВт).

Структура лавинного фотодиода на основе кремния:

- 1 - омические контакты,
- 2 - антиотражающее покрытие

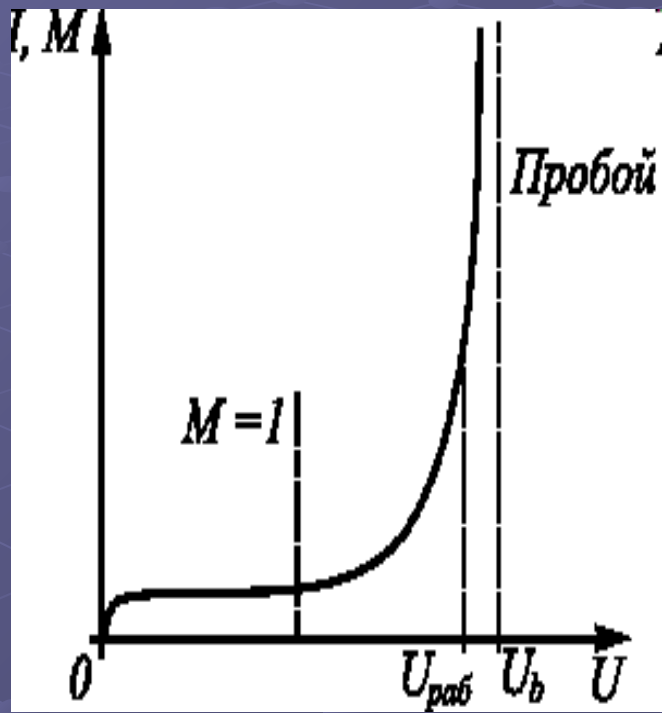


При подаче сильного обратного смещения (близкого к напряжению лавинного пробоя, обычно порядка нескольких сотен вольт для кремниевых приборов), происходит усиление фототока (примерно в 100 раз) за счёт ударной ионизации (лавинного умножения) генерированных светом носителей заряда. Суть процесса в том, что энергия образовавшегося под действием света электрона увеличивается под действием внешнего приложенного поля и может превысить порог ионизации вещества, так что столкновение такого "горячего" электрона с электроном из валентной зоны может привести к возникновению новой электрон-дырочной пары, носители заряда которой также будут ускоряться полем и могут стать причиной образования всё новых и новых носителей заряда.

Исходя из того, что в общем случае с возрастанием обратного напряжения растёт и коэффициент усиления, существует ряд технологий, позволяющих повысить напряжение пробоя до более чем 1500 вольт, и получить таким образом усиление более чем в 1000 раз. Следует иметь ввиду, что простое повышение напряженности поля без предпринятия дополнительных мер может привести к увеличению шумов.

$$M = \frac{1}{1 - \int_0^L \alpha(x) dx}$$

L - длина области пространственного заряда, а α — коэффициент умножения для электронов (и дырок). Этот коэффициент сильно зависит от приложенного напряжения, температуры и профиля легирования. Отсюда возникает требование хорошей стабилизации питающего напряжения и температуры, либо учёт температуры задающей напряжение схемой.

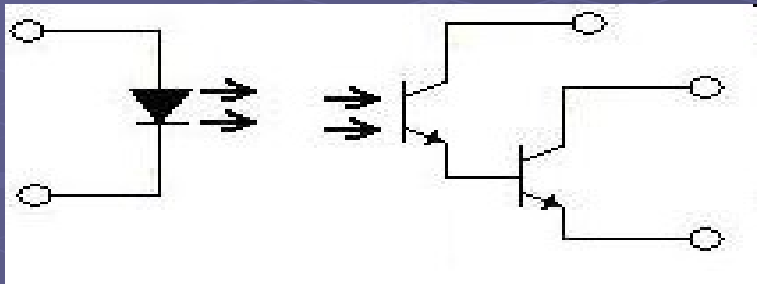


Технологии изготовления

Для создания данного класса приборов может быть использован широкий круг полупроводников:

- Кремний используется для работы в ближнем ИК-диапазоне, при этом имеет малые шумы, связанные с умножением носителей.
- Германий принимает инфракрасные волны длиной до 1.7 мкм, но приборы на его основе имеют заметные шумы.
- InGaAs обеспечивает приём волн длиной от 1.6 мкм, при этом имея меньшие нежели у германия шумы. Обычно этот материал используется для изготовления лавинных фотодиодов на гетероструктурах, также включающих InP в качестве подложки и второго компонента для создания гетероструктуры. Эта система имеет рабочий диапазон в пределах 0,9 — 0,7 мкм. У InGaAs высокий коэффициент поглощения на длинах волн, используемых в телекоммуникации через волоконно-оптические линии связи, таким образом достаточно даже микронных слоёв InGaAs для полного поглощения излучения. Эти материалы обеспечивают небольшие задержки и малые шумы, что позволяет получить устройства с полосой частот более 100 ГГц для простой InP / InGaAs системы и до 400 ГГц для InGaAs на кремнии. Это делает возможным передачу данных на скоростях, превышающих 10 Гбит/с
- Зонная диаграмма лавинного фотодиода на сверхрешетке.
- Нитрид галлия используется для работы с ультрафиолетовым светом

Фототранзистор



Фототранзистор — оптоэлектронный полупроводниковый прибор, вариант биполярного транзистора. Отличается от классического варианта тем, что область базы доступна для светового облучения, за счёт чего появляется возможность управлять усилением электрического тока с помощью оптического излучения.

Фототранзистор имеет структуру n-p-n или p-n-p транзистора и может усиливать ток. Дырки электронно-дырочных пар, рождённых излучением, находятся в базе, а электроны переходят в эмиттер или коллектор. При увеличении положительного потенциала базы происходит усиление фототока за счёт инжекции электронов из эмиттера в базу.