

# Методы исследований

# Измерение параметров неравновесных носителей заряда

Характеристики широкого класса полупроводниковых приборов - фотодиодов, фототранзисторов, приборов с зарядовой связью (ПЗС), солнечных батарей и др. - зависят от времени жизни, диффузионной длины, подвижности, скорости поверхностной рекомбинации неравновесных носителей заряда. Эффективность контроля этих параметров на разных этапах технологического процесса влияет на качество полупроводниковых устройств.

Неравновесные носители возникают в полупроводнике при воздействии света, рентгеновского и электронного облучений, потоков быстрых частиц, а также при инжекции из  $p$  -  $n$ -перехода, пробое и др.

# Измерение параметров неравновесных носителей заряда

Распределение неравновесных носителей в пространстве и времени определяется биполярным уравнением непрерывности. Для полупроводника  $n$ -типа уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = G - \frac{\Delta p}{\tau} - \mu E \nabla p + D \nabla^2 p,$$

где  $\Delta p$  - избыточная концентрация неравновесных носителей;  $\mu$  и  $D$  - биполярная подвижность и биполярный коэффициент диффузии;  $G$  и  $\frac{\Delta p}{\tau}$  - скорости генерации и рекомбинации неравновесных носителей;  $\tau$  - время жизни носителей.

Методы определения времени жизни  $\tau$ , диффузионной длины  $L_{\text{диф}}$ , подвижности  $\mu$  и скорости поверхностной рекомбинации  $S$  делятся на **стационарные** и **нестационарные**. Для определения этих характеристик в эксперименте создают условия, которые позволяют упростить уравнение и получить решения, удобные для нахождения искомых параметров по экспериментальным данным.

# Стационарный метод определения диффузионной длины

Стационарные методы определения диффузионной длины  $L_{\text{диф}}$  и времени жизни  $\tau$  основаны на измерении концентрации неравновесных носителей как функции координат при стационарном внешнем воздействии (например, световом). Уравнение непрерывности в отсутствие внешнего электрического поля ( $E=0$ ) в области, где подсветка отсутствует ( $G = 0$ ), имеет вид:

$$\nabla^2 p - \frac{\Delta p}{L_{\text{диф}}^2} = 0,$$

где  $L_{\text{диф}} = \sqrt{D\tau}$  - диффузионная длина.

Решение этого уравнения имеет простую форму, удобную для определения  $L_{\text{диф}}$  по результатам измерений, если геометрия образца и освещенной области обуславливают определенную симметрию.

Если освещенная область характеризуется малыми размерами (светящаяся точка), то распределение неравновесных носителей в полубесконечном образце имеет сферическую симметрию и уравнение приобретает следующий вид.

$$\nabla^2(\Delta p) - \frac{\Delta p}{L_{\text{диф}}^2} = \left( \frac{d^2}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d}{dr} \right) \Delta p - \frac{\Delta p}{L_{\text{диф}}^2} = 0.$$

# Стационарный метод определения диффузионной длины

Решением этого уравнения является функция

$$\Delta p(r) = \frac{\Delta p(0) e^{-\frac{r}{L_{\text{диф}}}}}{L_{\text{диф}}}$$

Измеряя величину сигнала пропорционального  $\Delta p(r)$  как функцию расстояния от освещенной области, определяют диффузионную длину  $L_{\text{диф}}$  неосновных носителей. Время жизни  $\tau$  можно рассчитать, используя соотношение  $L_{\text{диф}}^2 = D \cdot \tau$  или  $L_{\text{диф}}^2 = \mu \frac{kT}{e} \cdot \tau$

Решение уравнения справедливо, если скорость поверхностной рекомбинации  $S=0$ , а освещенная область удалена от боковых поверхностей на расстояние не менее нескольких диффузионных длин  $L_{\text{диф}}$ . Для тонких слоев учет поверхностной рекомбинации приобретает первостепенное значение. Для описания координатной зависимости  $\Delta p(x,y)$  следует решать двумерную задачу с граничными условиями, определяемыми свойствами конкретной структуры.

# Стационарный метод определения диффузионной длины

## Метод подвижного светового зонда

В малой освещенной области на поверхности образца n-типа проводимости генерируются неравновесные носители. Градиент концентрации носителей на границе с неосвещенной областью вызывает диффузию носителей. Часть из них рекомбинирует, а часть доходит до смещенного в обратном направлении p-n-перехода малой площади.

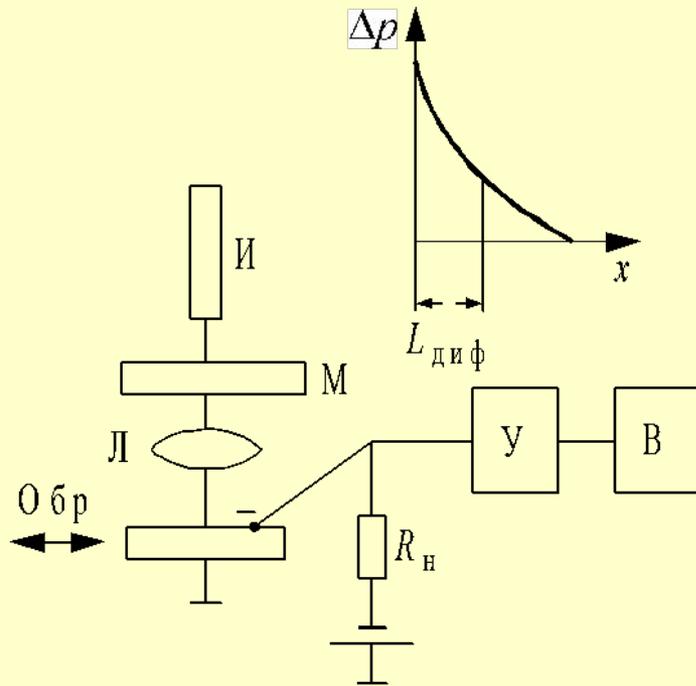
Ток коллектора, пропорционален концентрации неравновесных неосновных носителей  $\Delta p$ . Сигнал с нагрузочного резистора  $R_H$  подается на усилитель, а затем на вольтметр или осциллограф.  $R_H$  много меньше сопротивления коллектора  $R_K$  ( $R_K \geq 1 \cdot 10^5$  Ом,  $R_H \approx 1 \cdot 10^3$  Ом). Напряжение на коллекторе должно быть мало (около 0.3 – 0.5 В). Поверхность образца перед измерением подвергают химической обработке для существенного уменьшения скорости поверхностной рекомбинации  $S$ . Световой поток модулируют, для выделения части тока неосновных носителей, обусловленных светом. Частота модуляции - (30 – 300) Гц. Длительность светового импульса должна быть  $>(3 - 5)\tau$ , чтобы за время подсветки успевало установиться стационарное значение  $\Delta p$ . Промежуток между импульсами - достаточно большой, чтобы неравновесные носители успевали рекомбинировать.

# Стационарный метод определения диффузионной длины

## Метод подвижного светового зонда

Расстояние между световым пятном и контактом изменяется перемещением образца, закрепленного в держателе с микроподачей.

Метод позволяет определять  $L_{\text{диф}}$  в диапазоне от 0.4 мкм до 1 мм и используется главным образом для полупроводниковых материалов с низкой скоростью поверхностной рекомбинации (Ge). Измерения на Si затруднены из-за высокой скорости поверхностной рекомбинации на поверхности Si p-типа проводимости и высокого уровня шумов на контакте. Погрешность метода: (15 - 20)%.



Метод подвижного светового зонда. Блок-схема измерительной установки: И - источник света; М - модулятор; Л - линза; У - усилитель; В - вольтметр; Обр - образец

# Нестационарные методы измерения времени жизни

Нестационарные методы основаны на измерении временной зависимости  $\Delta p(t)$  в условиях, позволяющих пренебречь влиянием дрейфа и диффузии неравновесных носителей. Тогда основным процессом, определяющим изменение неравновесных носителей  $\Delta p(t)$ , является рекомбинация, и уравнение непрерывности

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = G - \frac{\Delta p}{\tau}$$

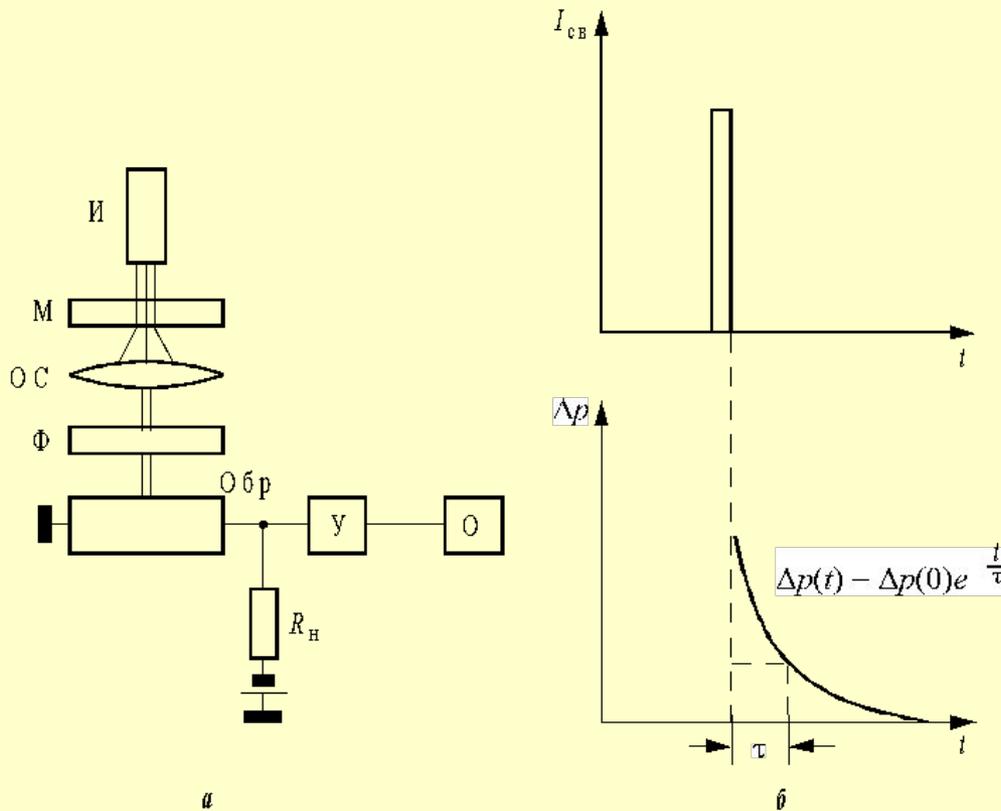
имеет простое решение. После выключения внешнего воздействия ( $G = 0$ ) изменение  $\Delta p(t)$  при малом уровне инжекции описывается функцией

$$\Delta p(t) = \Delta p(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

где  $\Delta p(0)$  - неравновесная концентрация в момент прекращения генерации.

# Методы измерения времени жизни

## Метод спада фотопроводимости



а – блок-схема установки; б - осциллограммы временных зависимостей интенсивности подсветки  $I_{св}(t)$  и неравновесной концентрации носителей  $\Delta p(t)$

Блок-схема установки и осциллограммы временных зависимостей интенсивности подсветки  $I_{св}(t)$  и неравновесной концентрации носителей  $\Delta p(t)$  — на рисунке.

Через образец пропускают малый постоянный ток или переменный ток высокой частоты от источника, работающего в режиме генератора тока ( $R_n \gg R_{обр}$ ). Генерация неравновесных носителей осуществляется в результате воздействия на образец коротких импульсов света от источника И длительностью  $T$ , много меньшей времени жизни  $\tau$  ( $T \ll \tau$ ).

ностью  $T$ , много меньшей времени жизни  $\tau$  ( $T \ll \tau$ ).

# Методы измерения времени жизни

## Метод спада фотопроводимости

Световой поток модулируют (М), он проходит систему линз ОС и фильтр Ф. Источником света могут быть импульсные лазеры (или газоразрядные лампы). Импульсы света с коротким фронтом можно получить и с помощью модулятора, принцип действия которого основан на эффекте Керра (явлении двойного лучепреломления при воздействии электрического поля). После окончания светового импульса концентрация носителей уменьшается вследствие рекомбинации. Сигнал, пропорциональный концентрации  $\Delta p(t)$ , подается на широкополосный усилитель У, а затем на осциллограф О.

Концентрация неосновных носителей спадает по экспоненте.

$$\Delta p(t) = \Delta p(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$

При измерениях необходимо выполнять следующие условия:

1) расстояние освещенной области до контактов должно быть не менее нескольких  $L_{\text{диф}}$ . Это необходимо, чтобы изменение  $\Delta p(t)$  было обусловлено рекомбинацией, а не "вытягиванием" носителей в контакт под действием поля напряженностью  $E$ ;

2) поле  $E$  должно быть малым (для Si  $E < 5 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ ), чтобы время пролета было больше времени жизни  $\tau$  ( $t_{\text{пр}} > \tau$ );

# Методы измерения времени жизни

## Метод спада фотопроводимости

- 3) для исключения процессов "прилипания" следует использовать постоянную подсветку образца;
- 4) измерения необходимо проводить при малом уровне инжекции;
- 5) образцы должны быть достаточно толстыми, чтобы уменьшить влияние поверхностной рекомбинации. Рекомендованные значения толщины образцов  $d$  при измерении времени жизни  $\tau$  (расчеты проводились в предположении, что скорость поверхностной рекомбинации  $S=(1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^4)$  см/с):

Толщина $d$ , мм	0.4	1	5	10	15	20
$\tau$ , мкс	1 - 2	3 - 11	70 - 200	300 - 700	600 - 1100	1000 - 3000

Метод используют для измерений  $\tau$  в высокоомных слитках и пластинах с  $\rho > 10$  Ом·см и  $\tau=(10 - 3 \cdot 10^2)$  мкс. Погрешность метода (10 – 20)% при  $S < 10^4$  см/с.

Применение импульсных лазеров для генерации неравновесных носителей и стробоскопических осциллографов для регистрации сигнала позволяет снизить нижний предел измерения  $\tau$  до 0.1 мкс. Для тонких образцов временная зависимость будет определяться поверхностной рекомбинацией.

# Методы измерения времени жизни

## Метод модуляции проводимости точечного контакта

Метод модуляции проводимости точечного контакта основан на изменении распределенного сопротивления точечного контакта при инжекции носителей заряда.

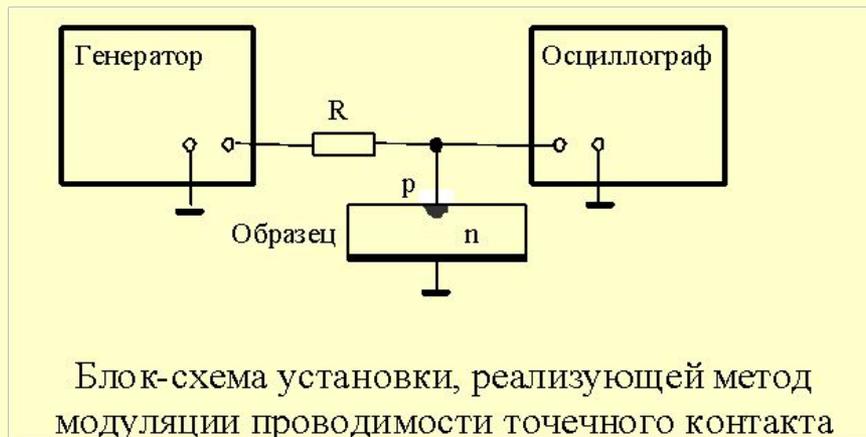
Дырки через  $p^+$ -контакт малой площади вводятся в  $n$ -базу диода. Контакт к  $n$ -области должен быть омическим, то есть не инжектирующим, имеющим линейную ВАХ и малое сопротивление. Через  $p^+$ - $n$  переход в прямом направлении

пропускаются два последовательных и равных по амплитуде импульса тока, сдвинутые друг относительно друга на время задержки  $t_d$ .

Блок-схема установки, реализующей метод модуляции проводимости точечного контакта представлена на рисунке.

С помощью первого импульса в область контакта инжектируются

неравновесные дырки, увеличивая проводимость полупроводника вблизи контакта, что приводит к уменьшению падения напряжения на базе, так как ток через образец поддерживается постоянным. Импульс напряжения не повторяет форму импульса тока, а имеет спад.



# Методы измерения времени жизни

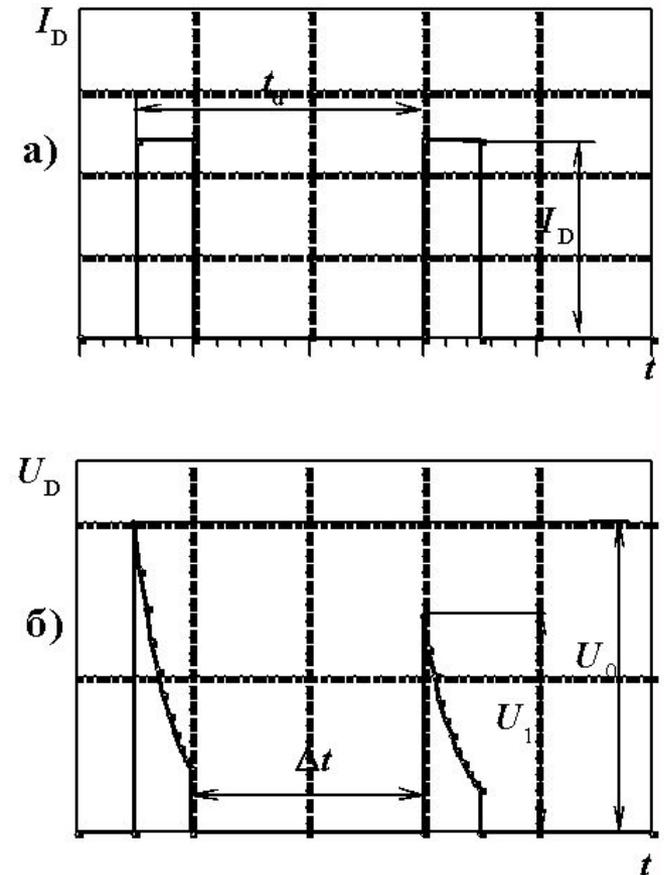
## Метод модуляции проводимости точечного контакта

По окончании первого инжектирующего импульса тока концентрация неравновесных носителей заряда начинает уменьшаться за счет их рекомбинации.

Предполагая, что уменьшение концентрации носителей заряда в базе происходит только за счет рекомбинации в объеме, пренебрегая рекомбинацией на поверхности образца, уходом носителей за счет диффузии, и учитывая сферическую симметрию распределения избыточных носителей, вводимых с помощью точечного контакта и сделанные выше предположения, уравнение непрерывности можно записать в виде

$$\frac{d[\Delta p(r,t)]}{dt} = -\frac{\Delta p(r,t)}{\tau}, \text{ откуда}$$

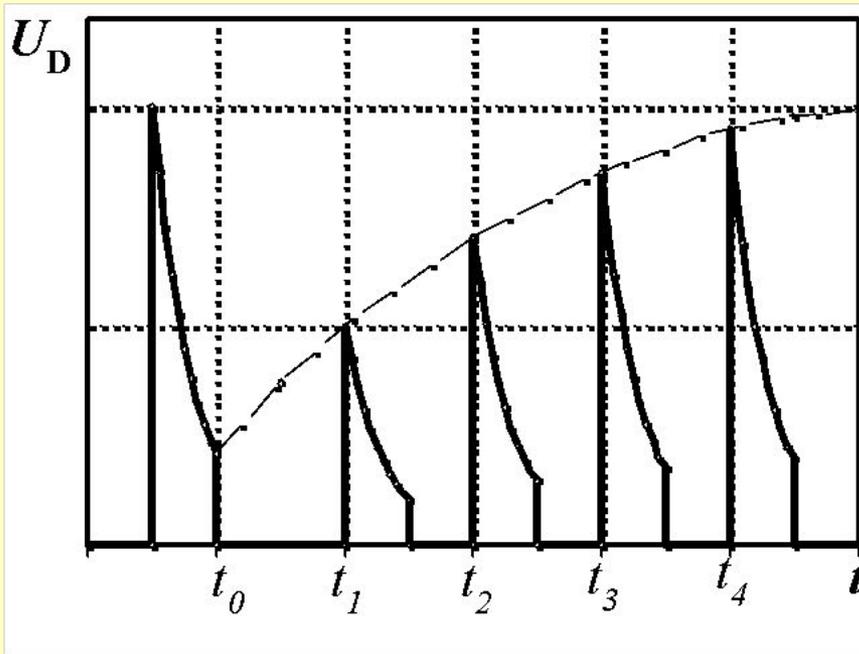
$$\Delta p(r,t) = \Delta p(r,0) \exp\left\{-\frac{t}{\tau}\right\}.$$



Осциллограммы а) импульсов тока через образец и б) падения напряжения на образце

# Методы измерения времени жизни

## Метод модуляции проводимости точечного контакта



Изменение амплитуды измерительного импульса в зависимости от времени задержки  $t$

Уменьшение концентрации неосновных носителей заряда приводит к возрастанию сопротивления образца. Закон изменения сопротивления образца во времени можно экспериментально определить, измерив падение напряжения на образце от второго измерительного импульса в зависимости от времени задержки. Огибающая импульсов представляет собой закон восстановления сопротивления образца во времени.

Закон изменения напряжения на образце во времени можно найти на основе модели точечного контакта

# Методы измерения времени жизни

## Метод модуляции проводимости точечного контакта

Пусть в полупроводник инжектируются неосновные носители с избыточной концентрацией  $\Delta p$ . При этом концентрация электронов в силу условия электронейтральности также возрастает на величину  $\Delta n = \Delta p$ . Проводимость образца определяется следующим соотношением.

$$\sigma = e\mu_n(n_0 + \Delta n) + e\mu_p(p_0 + \Delta p) = \sigma_0 \left[ 1 + \left( 1 + \frac{1}{b} \right) \frac{\Delta p}{n_0} \right],$$

где  $b = \mu_n / \mu_p$ ,  $\mu_n$  и  $\mu_p$  – соответственно подвижности электронов и дырок;  $\sigma_0$  – равновесная проводимость образца. Падение напряжения на точечном контакте, сопротивление которого определяется сопротивлением растекания равно

$$U(t) = I \int_0^{\infty} \frac{\rho}{2\pi r^2} dr,$$

где  $I$  – ток через контакт;  $\rho = \sigma^{-1}$  – удельное сопротивление образца;  $r_0$  – радиус контакта.

Учитывая выражение для  $\sigma$ , преобразуем формулу для  $U$  к следующему виду.

$$U(t) = \frac{I\rho_0}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{r^{-2}}{1 + \frac{1+b}{b} \frac{\Delta p}{n_0}} dr.$$

# Методы измерения времени жизни

## Метод модуляции проводимости точечного контакта

Так как уровень инжекции низкий, то предыдущее соотношение можно упростить.

$$U(t) = \frac{I\rho_0}{2\pi} \int_0^{\infty} r^{-2} \left[ 1 - \frac{1+b}{b} \frac{\Delta p}{n_0} \right] dr.$$

При измерениях удобно производить отсчет не напряжения  $U(t)$ , а разности между напряжением  $U(t)$  и напряжением на образце  $U_{\infty}$  при очень большом времени задержки, когда образец уже успевает вернуться в равновесное состояние.

$$\Delta U = \Delta U(t) = U_{\infty} - U(t) = \frac{I\rho_0}{2\pi} \exp\left\{-\frac{t}{\tau}\right\} \int_0^{\infty} r^{-2} \left[ 1 - \frac{1+b}{b} \frac{\Delta p}{n_0} \right] dr = C \exp\left\{-\frac{t}{\tau}\right\},$$

где  $C$  - некоторая константа.

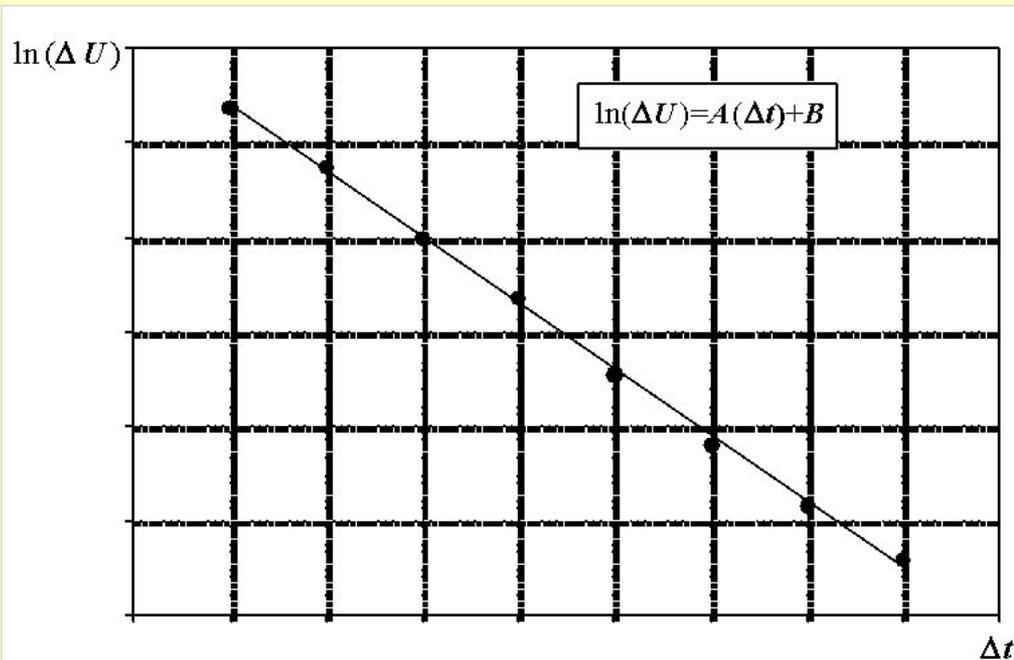
График зависимости  $\ln \Delta U(t) = f(\Delta t)$  представляет собой прямую линию  $\ln \Delta U(t) = A \cdot \Delta t + B$ . Время жизни неосновных носителей заряда  $\tau$  можно

определить из коэффициента  $A$  где  $A = -\frac{d[\ln(\Delta U)]}{dt}$ .

# Методы измерения времени жизни

## Метод модуляции проводимости точечного контакта

$$\tau = -\frac{1}{A}$$



Определение времени жизни из наклона прямой линии в координатах  $\ln\Delta U(t)$  и  $\Delta t$

При рассмотрении этого метода не учитывалась диффузия неравновесных носителей заряда и поверхностная рекомбинация. Учет этого усложняет метод. При проведении измерений надо создать условия, уменьшающие их влияние на результаты. Измерения проводят при малом уровне инжекции неосновных носителей, который определяется амплитудой и длительностью первого импульса. Значение амплитуды импульса тока подбирается экспериментально.

# Методы измерения времени жизни

## Метод модуляции проводимости точечного контакта

. При измерениях должны выполняться условия:

- 1) длительность импульсов должна быть не менее  $1.5\tau$ , что необходимо для ограничения влияния поверхностной рекомбинации и достижения стационарного распределения неравновесных носителей. Обычно  $T \sim 50$  мкс;
- 2) амплитуда инжектирующего импульса тока должна быть достаточно большой, чтобы скорость дрейфа носителей существенно превышала скорость поверхностной рекомбинации  $S$ . Тогда после окончания первого импульса изменение  $\Delta p(t)$  будет определяться рекомбинацией в объеме;
- 3) измерения следует проводить в диапазоне  $t_3$  не меньше  $2\tau$ ;
- 4) частота следования парных импульсов должна быть невысока  $\sim (50 - 200)$  Гц, чтобы в промежутке между парами импульсов избыточные носители успевали прорекомбинировать;
- 5) контакт к объему образца должен иметь большую площадь, чтобы последовательное сопротивление образца было пренебрежимо мало.

Метод модуляции проводимости точечного используется для измерений  $\tau$  в Si и Ge. Диапазон измерения времени жизни  $\tau$  (1 – 500) мкс в образцах с удельным сопротивлением (0.1 – 300) Ом·см. Погрешность метода составляет (20 – 30)%.

# Методы измерения времени жизни

## Сравнительные характеристики методов определения параметров неравновесных носителей заряда

Метод	Время жизни, мкс	Погрешность, %	Удельное сопротивл., Ом·см	Дифф. длина, мкм	Образцы
Подвижного светового зонда	1 – 100	15 – 20	0.01 – 100	0.4 – 1000	Ge
Затухания фотопроводимости	10 – 300	10 – 20	>10	100 – 2000	С малой скоростью поверхностной рекомбинации
Модуляции проводимости точечным контактом	1 – 500	20 – 30	0.1 – 300	3 – 3000	Si, Ge, GaAs

# Скорость поверхностной рекомбинации

Некоторые ПС могут быть эффективными центрами рекомбинации (ЦР). Может оказаться, что темп рекомбинации на поверхности много выше, чем в объеме. Активными ЦР на поверхности могут быть лишь быстрые ПС, так как время перехода на медленные ПС так велико, что не может быть обеспечен темп рекомбинации, сравнимый с объемной рекомбинацией. Влияние ПР на  $\tau$  существенно, если число электронно-дырочных пар, рекомбинирующих на поверхности составляет заметную долю общего числа носителей заряда, рекомбинирующих в полупроводнике.

Скоростью ПР  $S$  называется величина, равная отношению числа введенных носителей, рекомбинирующих в единицу времени на единицу площади поверхности, к концентрации введенных носителей в приповерхностном слое. Приповерхностным слоем считается ОПЗ распространяющаяся от поверхности полупроводника на расстоянии  $1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-4}$  см. Для химически обработанных поверхностей германия величина  $S$  имеет минимальные значения (10 – 100 см/сек). Механически обработанные поверхности германия характеризуются максимальным значением  $S$  ( $1 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^5$  см/сек).

В реальных структурах  $\tau$  определяется как объемными, так и поверхностными явлениями, разделить их влияние трудно. В тонких образцах именно ПР определяет реальное время жизни.

# Скорость поверхностной рекомбинации

В пластине толщиной  $2d$ , не ограниченной по  $y$  и  $z$ , изменение  $\Delta p(x)$  после выключения внешнего воздействия и при  $E=0$  описывается одномерным уравнением непрерывности

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = -\frac{\Delta p}{\tau} + D \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2},$$

граничные условия:  $D \frac{\partial \Delta p}{\partial x} = \pm S \Delta p(x)$  при  $x = \pm d$ .

Решение уравнения непрерывности находят методом разделения переменных.

$$\Delta p(x, t) = \sum_i G_i \cos \frac{x}{d} \xi_i \exp \left[ -t \left( \frac{1}{\tau} + v_i \right) \right],$$

где  $v_i = \frac{D \xi_i^2}{d^2}$ , а коэффициенты  $G_i$  определяются начальными условиями.

Зависимость  $\Delta p(x, t)$  содержит две экспоненты:  $\exp \left( -\frac{t}{\tau} \right)$  определяется рекомбинацией в объеме,  $\exp(-v_i t)$  - рекомбинацией на поверхности. Используя граничные условия, получают

$$\frac{D}{Sd} \xi_i = \text{ctg} \xi_i.$$

При достаточно больших  $t$  преобладает первая гармоника и эффективное время жизни  $\tau_{\text{эф}}$  определяется формулой

# Скорость поверхностной рекомбинации

Для определения объемного времени жизни  $\tau$  толщина образца должна быть много больше  $L_{\text{диф}}$ , а поверхность образца необходимо подвергнуть химической обработке с целью уменьшения скорости поверхностной рекомбинации.

Напротив, для определения  $S$  следует использовать тонкие образцы. Некоторые примеры, часто реализуемые на практике.

1. Пусть  $S \rightarrow =\infty$  при  $x \rightarrow \pm d$ , а на боковых границах  $S=0$ . Тогда  $\frac{D\xi_1}{dS} = \text{ctg}\xi_1 = 0$  и

$$\xi_1 = \frac{\pi}{2}. \text{ Поэтому } v_1 = \frac{\pi^2 D}{4d^2} \text{ и } \frac{1}{\tau_{\text{эф}}} = \frac{1}{\tau} + \frac{\pi^2 D}{4d^2}.$$

Если  $d \gg L_{\text{диф}}$ ,  $\tau_{\text{эф}} = \tau = \frac{L_{\text{диф}}^2}{D}$ . Этот результат справедлив для толстого образца.

В тонком образце ( $d \ll L_{\text{диф}}$ ) определяющим для  $\tau_{\text{эф}}$  будет второе слагаемое в формуле и  $\tau_{\text{эф}} \cong \frac{4d^2}{\pi^2 D}$ .

2. При конечной скорости поверхностной рекомбинации

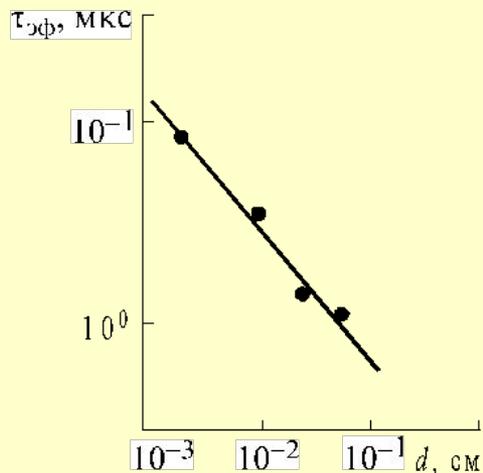
$$\frac{1}{\tau_{\text{эф}}} = \frac{1}{\tau} + v_1 = \frac{1}{\tau} + \frac{D\xi_1^2}{d^2}.$$

# Скорость поверхностной рекомбинации

$$\frac{1}{\tau_{\text{эф}}} = \frac{1}{\tau} + \nu_1.$$

Величина  $\nu_1$  зависит от геометрических размеров образца и скорости поверхностной рекомбинации  $S$  и равна  $\nu_1 = \frac{D\xi_1^2}{d^2}$ .

Измеряя  $\tau_{\text{эф}}$  в образцах различной толщины, определяют  $\xi_1$  по наклону графика  $\frac{1}{\tau_{\text{эф}}} = f\left(\frac{1}{d^2}\right)$  и рассчитывают  $S$ , используя равенство.



Зависимость эффективного времени жизни носителей от толщины образца

Если  $S$  мала, то условие приобретает вид:

$$\frac{D}{dS} \xi_1^2 = 1 \text{ и } \frac{1}{\tau_{\text{эф}}} = \frac{1}{\tau} + \frac{S}{d}.$$

Ясно, что скорость поверхностной рекомбинации  $S$  будет определять измеряемое время жизни, если  $\frac{S}{d} \gg \frac{1}{\tau}$ , то есть в тонких образцах. Величину  $\frac{d}{S}$  можно интерпретировать как время жизни, обусловленное рекомбинацией на поверхности.

Таким образом, определение  $S$  основано на измерении  $\tau$  на тонких образцах разной толщины.

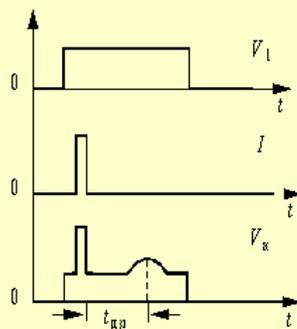
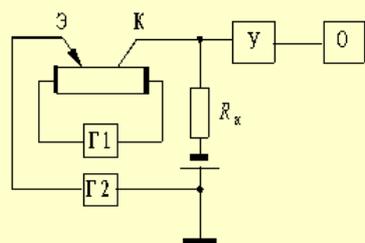
# Определение дрейфовой подвижности

Подвижность носителей чаще всего определяют с помощью эффекта Холла. При этом используют образцы заданной геометрической формы с омическими контактами к ним.

Методом определения дрейфовой подвижности является метод Шокли-Хайнса. Через эмиттерный контакт Э пропускают короткий импульс тока от генератора Г2, обеспечивающий инжекцию неосновных носителей в образец. Неравновесные носители дрейфуют в электрическом поле  $E$ , созданном в образце с помощью генератора Г1.

Распределение неравновесных носителей определяется формулой

$$\Delta p(x, t) = \frac{B}{\sqrt{t}} \exp\left(-\frac{x}{\tau}\right) e^{-\frac{(x-\mu Et)^2}{4Dt}}$$



Метод определения дрейфовой подвижности: *а* - схема измерительной установки (Г1, Г2 - импульсные генераторы; У - усилитель; О - осциллограф; Э и К - выпрямляющие контакты на поверхности образца;  $R_H$  - нагрузочный резистор); *б* - осциллограммы сигналов

Это решение нестационарного одномерного уравнения непрерывности, описывающее движение носителей в однородном электрическом поле  $E$  с учетом рекомбинации со временем жизни  $\tau$  и диффузии с коэффициентом  $D$ .

Сигнал  $V_H$  на коллекторе К "размыт" по времени вследствие рассеяния носителей в процессе диффузии от эмиттера к коллектору. Величина "размытия" пропорциональна  $\sqrt{Dt_{др}}$ , где  $t_{др}$  - время дрейфа носителей от эмиттера к коллектору.

# Определение дрейфовой подвижности

Ток через эмиттер должен быть по возможности минимальным, чтобы свести к минимуму нарушение однородности электрического поля в образце из-за инжекции неравновесных носителей. Измерение времени дрейфа  $t_{др}$  проводят при нескольких значениях амплитуды инжектирующего импульса, а при расчете подвижности используют  $t_{др}$ , полученное экстраполяцией при амплитуде инжектирующего импульса, стремящейся к нулю.

Подвижность рассчитывают по известному значению поля  $E$  и времени дрейфа  $t_{др}$  неравновесных носителей между эмиттером и коллектором, разделенных расстоянием  $l$ :

$$\mu = \frac{l}{Et_{др}}$$

Чтобы "размытие" импульса на коллекторе было достаточно малым, необходимо выполнение условия

$$E \gg \frac{kT}{eL_{диф}}$$

Для кремния напряженность электрического поля  $E$  должна быть не меньше 10 В/см.

Значения параметров, определяющих поведение неравновесных носителей в Si, обычно укладываются в следующих пределах:

$\tau$ , с	$10^{-11} - 10^{-3}$
$S$ , см/с	$1 - 10^6$
$L_{диф}$ , мкм	$10^{-1} - 10^3$