

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры  
(КУДР)

ИЗМЕРЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА

РУКОВОДСТВО  
к лабораторной работе по курсу  
«Физические основы микро- и нанoeлектроники»  
для студентов, обучающихся по направлению  
11.03.03 - «Конструирование и технология электронных средств»

РАЗРАБОТЧИК  
доцент каф. КУДР  
М.М. Славникова

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Подвижность носителей заряда является важной характеристикой полупроводниковых материалов. Подвижность характеризует скорость направленного перемещения носителей в электрическом поле - скорость дрейфа и зависит от структуры материала, степени его совершенства, температуры окружающей среды, напряженности электрического поля в сильных полях. При производстве полупроводниковых приборов по величине подвижности определяют частотный диапазон работы. Целью настоящей работы является определение дрейфовой подвижности импульсным методом.

## 2. ДВИЖЕНИЕ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ОТСУТСТВИЕ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В отсутствие электрических и магнитных полей свободные электроны (или свободные дырки) в полупроводнике совершают беспорядочное тепловое движение. При этом траектория единичного электрона (дырки) представляет собой ломаную линию, состоящую из последовательности прямых отрезков между точками столкновений. Длина этих прямых отрезков, определенная как средняя из многих таких отрезков, называется длиной свободного пробега носителя ( $l$ ). Средний промежуток времени между последовательными столкновениями частиц называется временем свободного пробега или временем релаксации носителей ( $\tau$ )

$$\tau = l/V_m, \quad (2.1.)$$

где  $V_m$  - тепловая скорость носителей (не путать время релаксации  $\tau$  со временем жизни неравновесных носителей, обозначаемых также).

Обычно в проводниках число частиц мало по сравнению с числом доступных для них состояний (невырожденный электронный газ). Поэтому участвующие в проводимости частицы описываются классическим максвелловским распределением по энергиям и скоростям и их средняя энергия равна  $3/2 kT$ , а тепловая скорость:

$$V_m = \sqrt{\frac{8kT}{\pi \cdot m^*}}, \quad (2.2.)$$

При  $T=300 K$   $V_m \approx 10^5$  м/с.

При длине свободного пробега порядка 1000 ангстрем время релаксации будет иметь порядок  $10^{-1}$  с.

В каких же точках кристалла электрон испытывает столкновение? Или, другими словами, испытывает рассеяние? Такими точками являются любые нарушения периодичности кристаллической решетки идеального кристалла. Это дефекты, вызванные механическими нарушениями кристаллической решетки, дислокации, примесные атомы, грани реального образца. Последний вид дефектов особенно заметен, если толщина образца сравнима или меньше длины свободного пробега носителей заряда. К дефектам решетки относятся и фононы (колебания собственных атомов кристалла под воздействием тепловой энергии).

Причем, рассеяние носителей на фонах является основным и доминирующим в рабочей области температур реальных приборов.

Итак, ввиду хаотичности движения носителей в отсутствие электрического поля ток через образец не переносится и образец в целом и в любой точке обладает электрической нейтральностью.

### 3. ДВИЖЕНИЕ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

При наложении на проводник внешнего электрического поля  $E$  все время пока частица свободна (от одного столкновения до другого) она может ускориться электрическим полем. Это ускорение можно определить:

$$a = F/m^* = \frac{q \cdot E}{m^*}, \quad (3.1.)$$

где  $F$  - сила, действующая на частицу в электрическом поле;

$E$  - напряженность электрического поля;

$q$  – заряд электрона;

$m^*$  - эффективная масса носителя заряда.

За счет ускорения увеличивается скорость, которой частица уже обладает ( $V_m$ ) и прирост скорости ( $V_{др}$ ) направлен в сторону поля. При следующем столкновении частица отдает решетке избыток импульса, который она получила со времени последнего столкновения. При этом необязательно при каждом столкновении может передаваться весь приобретенный импульс. Частица может испытать несколько последовательных упругих столкновений, а затем передать накопленный излишек импульса решетке за один удар.

Движение частицы в направлении поля происходит маленькими скачками, постоянно прерываемыми столкновениями, подобно движению шарика, падающего сквозь лабиринт из проволочек. Постепенное перемещение частицы создает дрейфовый электрический ток, плотность которого можно определить следующим образом

$$j = q \cdot V_{др}, \quad (3.2.)$$

где  $j$  – плотность тока;

$q$ - заряд частицы;

$V_{др}$  – скорость дрейфа частицы в направлении электрического поля.

### 4. ПОДВИЖНОСТЬ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА

Простой расчет, основанный на понятиях классической механики, показывает, что дрейфовая скорость частицы в электрическом поле равна

$$V_{др} = \frac{q \cdot \tau}{m^*} \cdot E. \quad (4.1.)$$

$$\mu = \frac{q \cdot \tau}{m} \quad (4.2.)$$

Величина  $\mu$  называется подвижностью носителей заряд, т.е. подвижность является коэффициентом пропорциональности между скоростью дрейфа  $V_{др}$  и

напряженностью электрического поля  $E$ . Тогда

$$V_{др} = \mu \cdot E. \quad (4.3.)$$

В слабых электрических полях подвижность постоянна и не зависит от напряженности электрического поля. Следовательно, при увеличении напряженности поля дрейфовая скорость будет увеличиваться по линейному закону.

Размерность подвижности определяется из соотношения (4.3.) и в системе СИ равна:

$$[\mu] = \frac{[V_{др}]}{[E]} = \frac{M^2}{C \cdot B} \quad (4.4.)$$

Итак, подвижность носителей заряда характеризует скорость движения заряженной частицы в электрическом поле. Численно подвижность равна скорости дрейфа частиц в направлении единичного электрического поля (например, при  $E = 1$  В/м).

Величина подвижности, исходя из соотношения (42.), определяется зарядом, эффективной массой и временем релаксации носителей  $\tau = l/V_m$  и является константой для данного образца при постоянной температуре. Поскольку время релаксации зависит от длины свободного пробега и тепловой скорости носителей подвижность сильно зависит от температуры и степени совершенства материала, а для тонких образцов - совершенства его поверхности. В табл. 4.1 приведены типичные значения подвижности носителей для различных кристаллов при комнатной температуре.

Значения подвижности носителей заряда

Материал	$\mu_n, M^2/V \cdot c$	$\mu_p, M^2/V \cdot c$
Алмаз	0,18	0,12
Кремний	0,15	0,05
Германий	0,38	0,18
Арсенид галлия	0,85	0,04
Нитрид галлия	0,85	0,04
Карбид кремния	0,065	0,03
Арсенид индия	0,23	0,01

## 5. ПРЯМОЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПОДВИЖНОСТИ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА

Прямой метод измерения подвижности основан на непосредственном определении времени пролета ( $t_{др}$ ) носителями известного отрезка пути ( $d_{эк}$ ). Тогда подвижность можно вычислить из соотношения

$$\mu = \frac{V_{др}}{E} = \frac{d_{эк}}{E \cdot t_{др}}. \quad (5.1)$$

Сущность данного метода заключается в следующем (рис. 5.1).

К образцу полупроводника, поперечные размеры которого много меньше

длины, прикладывается прямоугольный импульс напряжения длительностью  $\tau_1$ , от генератора  $\Gamma_1$ . Этот импульс создает вдоль образца «тянущее» поле, под действием которого движутся носители от эмиттера(Э) к коллектору(К). Спустя некоторое время  $t_1$  через инжектирующий контакт (эмиттер) в объем образца вводятся неосновные

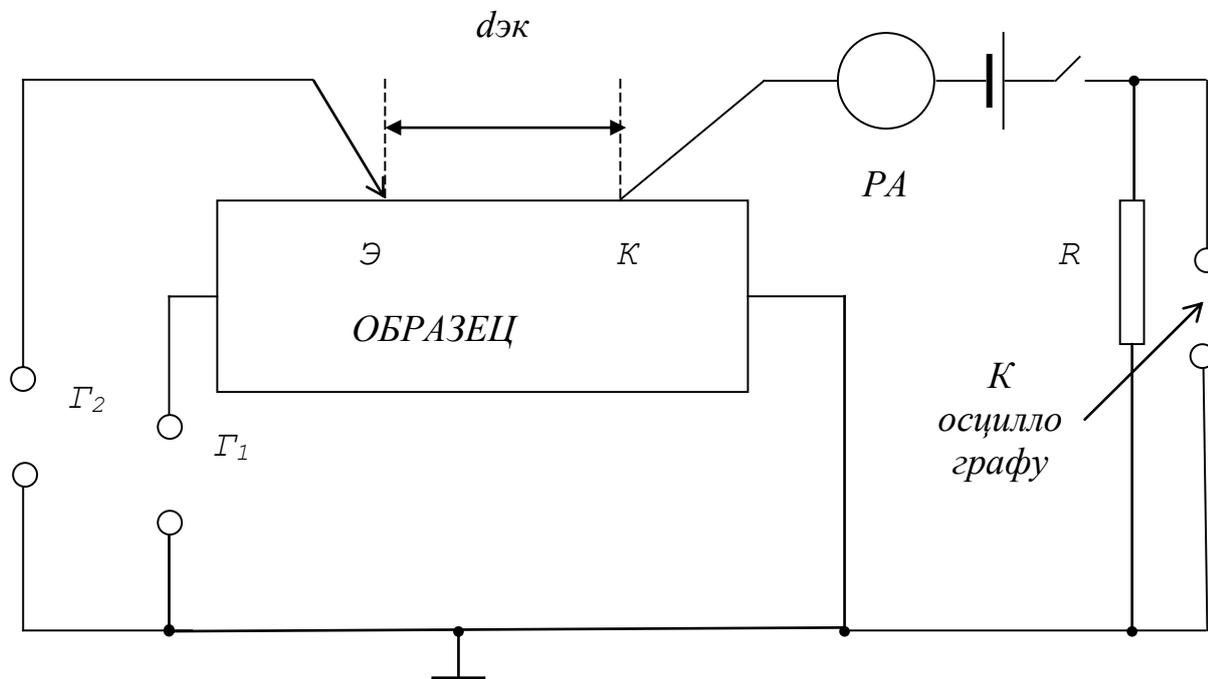


Рисунок 5.1. Схема установки для измерения подвижности неосновных неравновесных носителей заряда

неравновесные носители заряда с помощью импульса тока длительностью  $\tau_2$  от генератора  $\Gamma_2$  через эмиттерный контакт.

Инжектированные неосновные носители заряда, попав в тянущее поле, перемещаются вдоль образца с некоторой дрейфовой скоростью  $V_{др}$  и через время  $t_{др}$  достигают коллекторного зонда. Коллектор представляет собой  $p-n$  переход, включенный в обратном направлении. Величина его тока обуславливается количеством неосновных носителей, находящихся под ним. Поэтому, когда инжектированные носители проходят мимо  $p-n$  перехода, его ток увеличивается и регистрируется осциллографом.

На рис. 5.2 приведена осциллограмма импульсов, получаемая в этом случае.

Время  $t_{др}$  измеряется по осциллографу, расстояние между эмиттерным и коллекторным контактами тоже замерить не трудно.

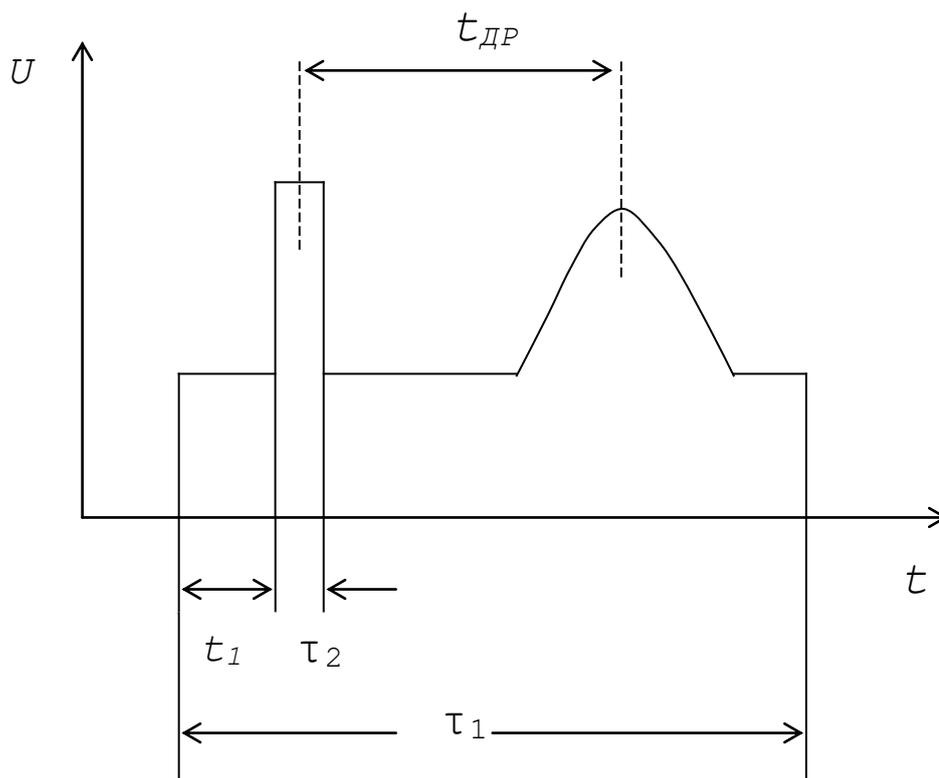


Рисунок 5.2. Осциллограмма импульсов

## 6. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Ознакомьтесь по описаниям с приборами, используемыми в работе (принцип действия, назначение ручек управления и т.п.). Провести эксперимент в следующем порядке :

1. включить в сеть генератор и осциллограф и дать прогреться 5-10 минут;
2. подать напряжение с выходов генератора (вывести ручки «амплитуда» влево);
3. установить частоту повторения (следование импульсов) генератора  $2 \cdot 10^2$  Гц;
4. установить длительность импульса канала 1 - 0,4 мс;
5. установить длительность импульса канала 2 – 10 мкс
6. установить задержку между импульсами 50 мкс ;
7. подать синхронизирующий импульс с соответствующего выхода генератора на X- канал осциллографа;
8. с помощью высокочастотного кабеля подключить выход канала 2 на клеммы «ИНЖЕКТИРУЮЩИЙ ИМПУЛЬС» макета;
9. подключить импульс канала 1 на клеммы «ТЯНУЩЕЕ ПОЛЕ» макета;
10. подключить к осциллографу выходные клеммы «ОСЦИЛЛОГРАФ» макета;
11. установить режим работы осциллографа: внешняя синхронизация, ждущая развертка, импульс запуска нужной полярности;
12. ручкой «СИНХРОНИЗАЦИЯ» осциллографа установить на экране устойчивое изображение;

13. установить длительность развертки так, чтобы были видны оба импульса (см. рис. 5.2.);

14. убедиться, что наблюдаются нужные импульсы (можно изменить амплитуды, длительности каждого из сигналов);

15. измерить расстояние между серединами инжектирующего импульса и импульса коллектора, изменяя напряжение тянущего поля от 5 до 10 вольт через один вольт;

Внести данные измерений в таблицу:

$U_{тян}, В$	$t_{др}, мкс$	$E_{тян}, В/см$	$\mu, см^2/(В \cdot с)$	Примечание
5				$d_{эк}=10$ мм
6				$d_{обр}=18$ мм
7				$\mu_{ср}$
8				
9				
10				

## 7. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ

7.1. Пояснить физическую сущность понятия дрейфовой подвижности.

7.2. От каких факторов зависит величина подвижности?

7.3. В чем физическая сущность метода измерения подвижности?

7.4. Как зависит величина "ответа" от расстояния между эмиттером и коллектором?

7.5. Как рассчитать подвижность в данной работе?

7.6. Обязательно ли тянущее поле должно быть импульсным?

7.7. Как рассчитать величину дрейфовой скорости?

7.8. В каких единицах измеряется подвижность?

7.9. Что такое длина свободного пробега носителей?

7.10. Что такое время релаксации?

7.11. Какие дефекты изменяют величину подвижности?

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков В. В. Теоретические основы микроэлектроники, - М.: Высшая школа, 1972, с. 167 – 182.

2. Несмелов Н.С., Славникова М.М., Широков А.А. Физические основы микроэлектроники: Учеб. пособие. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 262 с.

3. Штернов А.А. Физические основы конструирования и технологии РЭА и микроэлектроники. – М.: Радио и связь, 1981, с. 51 – 54.