

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

М.М. Славникова  
С.А. Артищев

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ГАННА**

Методические указания к лабораторному занятию по дисциплине  
«Физические основы микро- и нанoeлектроники»

Томск  
2022

УДК 538.915  
ББК 22.35  
С 470

Рецензент

**Еханин С.Г.**, доцент кафедры конструирования узлов и деталей РЭА, доктор физ.-мат. наук

**Славникова Марина Михайловна, Артищев Сергей Александрович**

Исследование эффекта Ганна: методические указания к лабораторному занятию по дисциплине «Физические основы микро- и наноэлектроники» / М.М. Славникова, С.А. Артищев. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 11с.

В методических указаниях кратко изложено взаимодействие двух близкорасположенных электронно-дырочных переходов. Показано, что от расстояния между переходами – ширины база – зависит ток коллекторного перехода биполярного транзистора, мощность и максимальная рабочая частота. Приведены методика измерений, порядок выполнения лабораторной работы, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы.

Предназначено для студентов, изучающих курс «Физические основы микро- и наноэлектроники».

Одобрено на заседании каф. КУДР, протокол № 234 от 5 марта 2022 г.

УДК 538.915  
ББК 22.35

© Славникова М.М., 2022  
© Артищев С.А., 2022  
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

1	Введение.....	4
2	Вольт-амперная характеристика диода Ганна.....	4
3	Доменная устойчивость.....	8
4	Порядок выполнения работы.....	10
5	Контрольные вопросы.....	11
	Список рекомендуемой литературы.....	11

## 1 ВВЕДЕНИЕ

В 1963 г. Ганн обнаружил, что в бруске арсенида галлия (GaAs) при приложении к нему постоянного напряжения определенной величины возникали периодические колебания протекающего тока. Период колебаний приблизительно равнялся времени пролета электронов через образец и соответствовал частоте СВЧ диапазона ( $f \sim 10^{10}$  Гц). Это открытие привело к созданию весьма перспективного полупроводникового СВЧ генератора на диоде Ганна.

## 2 ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИОДА ГАННА

2.1. Диод Ганна представляет собой образец полупроводника (обычно GaAs), на противоположные торцы которого, ориентированные в кристаллографическом направлении [100], нанесены омические контакты: анод и катод (рисунок 2.1)

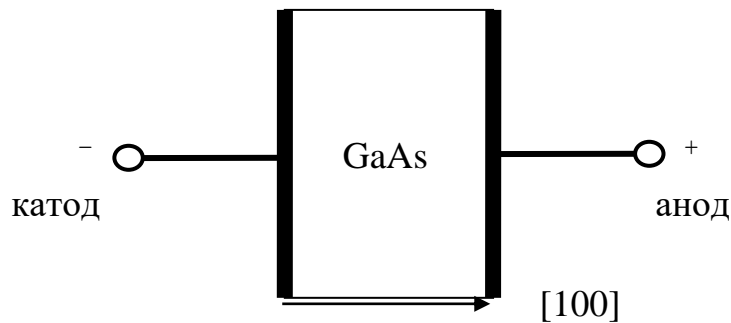


Рисунок 2.1 – Схематическое изображение диода Ганна

2.2. Структура энергетических зон арсенида галлия показана на рисунок 2.2. В зоне проводимости имеется два минимума, называемых долинами, эффективные массы электронов в которых существенно различаются. Действительно, по определению эффективная масса

$$m^* = \frac{\hbar^2}{\frac{\partial^2 E}{\partial k^2}}, \quad (2.1)$$

где  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  – приведенная постоянная Планка;

$\frac{\partial^2 E}{\partial k^2}$  – кривизна зависимости  $E(k)$ .

Так как кривизна нижнего минимума больше, чем верхнего, то из выражения (2.1) следует, что  $m^*_1 < m^*_2$ . Подвижность определяется формулой

$$\mu = \frac{q\tau}{m_n^*}, \quad (2.2)$$

где  $\mu$  – подвижность,

$\tau$  – время релаксации носителей заряда.

Из формулы (2.2) следует, что подвижность легких электронов в первом минимуме будет выше, чем тяжелых во втором. Обычно  $m^*_1 = 0,072 m_0$ ,  $m^*_2 = 1,2 m_0$ ,  $\mu_1 \sim (5-8) \times 10^3 \text{ м}^2/\text{В.с}$ ,  $\mu_2 \sim 100 \text{ см}^2/\text{В.с}$ . Здесь  $m_0$  – масса свободного электрона.

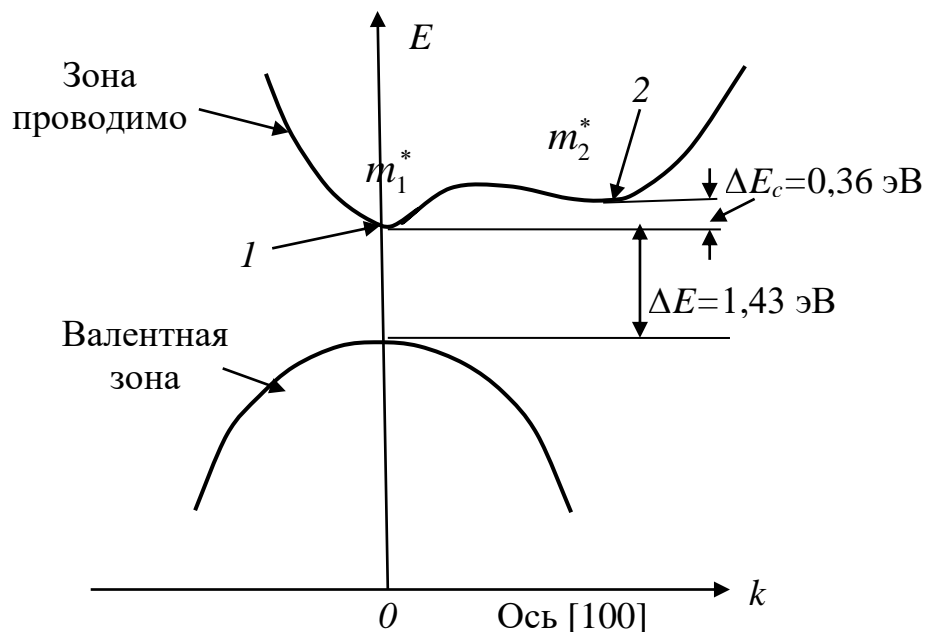


Рисунок 2.2 – Структура энергетических зон арсенида галлия

(1 - нижний минимум зоны проводимости, 2- верхний минимум зоны проводимости,  $E$ - энергия электрона,  $k$  - волновое число,  $m_1^*$  – эффективная масса электрона в минимуме 1,  $m_2^*$  – эффективная масса электрона в минимуме 2).

2.3. При малой напряженности электрического поля  $\mathring{A}$  в полупроводнике все свободные электроны находятся в минимуме 1 (рисунок 2.3, а, штриховка показывает заполнение долины электронами). При этом плотность тока через диод линейно увеличивается с ростом напряженности в соответствии с законом Ома (рис.2.4, область 1):

$$j = q\mu n_0 \mathring{A}, \quad (2.3)$$

где  $q$  - заряд электрона;

$n_0$  - концентрация свободных электронов в полупроводнике;

$\mathring{A}$  - напряженность электрического поля.

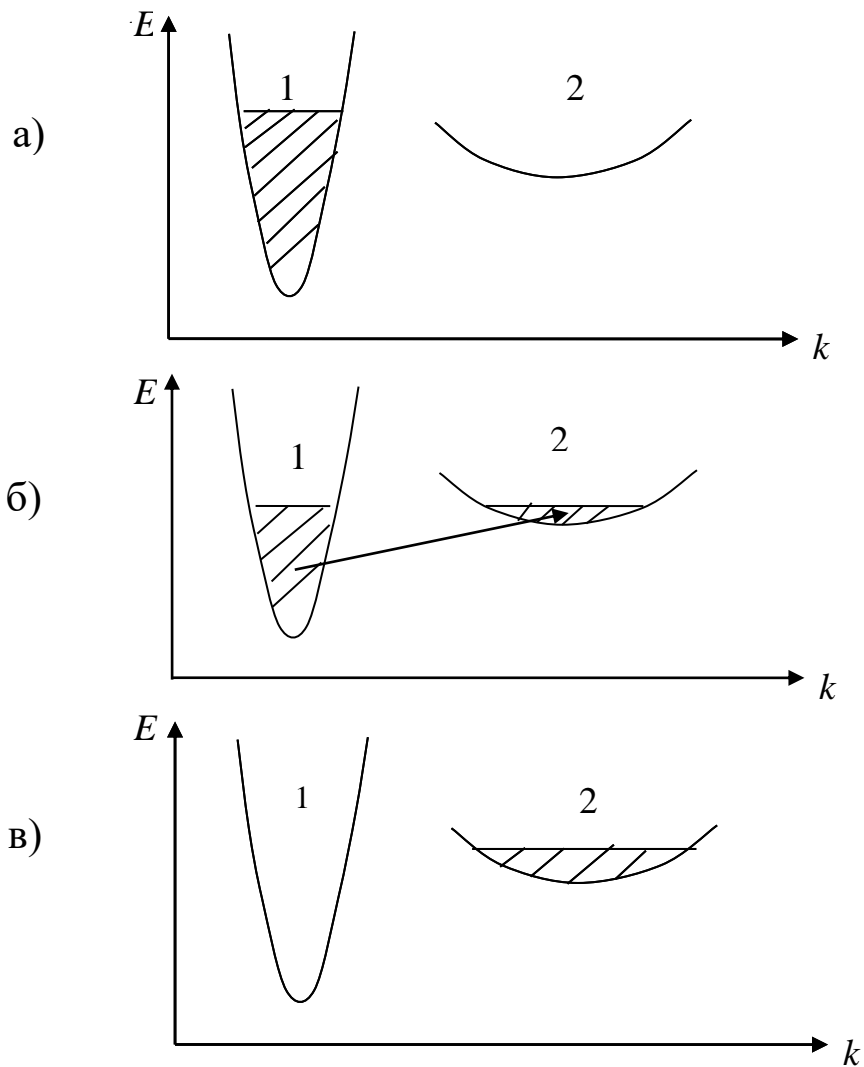


Рисунок 2.3 – Распределение электронов по минимумам зоны проводимости при различной напряженности электрического поля  
а)  $\mathring{A} < \mathring{A}_{пор}$  , б)  $\mathring{A}_{пор} < \mathring{A} < \mathring{A}_{ост}$ , в)  $\mathring{A} > \mathring{A}_{ост}$ .

2.4. При напряженности электрического поля  $\mathring{A}_{пор}$  некоторые свободные электроны будут иметь энергию  $\Delta E_c$  (см. рисунок 2.2), достаточную для их перехода из нижнего минимума в верхний (см. рисунок 2.3, б). Напряженность поля  $\mathring{A}_{пор}$ , при которой начинаются такие переходы, называется пороговой. Уменьшение подвижности электронов, перешедших в верхний минимум, вызывает замедление роста тока при повышении напряженности электрического поля,

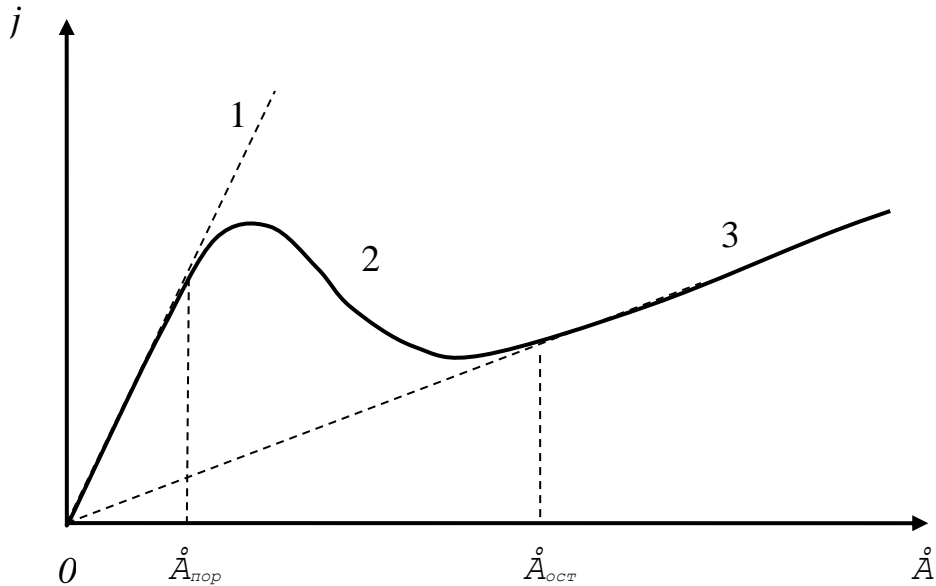


Рисунок 2.4 – Зависимость плотности тока от напряженности электрического поля для диода Ганна  
 $(1 - j = q\mu_1 n_0 \dot{A}, 2 - j = q\mu_1 n_1 \dot{A} + q\mu_2 n_2 \dot{A}, 3 - j = q\mu_2 n_2 \dot{A}).$

а затем и спад (см. рисунок 2.4, область 2). Вольтамперная характеристика в этом случае описывается выражением

$$j = q\mu_1 n_1 \dot{A} + q\mu_2 n_2 \dot{A} \quad (2.4.)$$

где  $n_1$  – концентрация электронов в нижнем минимуме;

$n_2$  – концентрация электронов в верхнем минимуме.

В процессе перехода электронов из первого минимума во второй величина  $n_1$  уменьшается, а  $n_2$  возрастает, так что количество свободных носителей заряда в полупроводнике при этом остается постоянным

$$n_0 = n_1 + n_2 \quad (2.5)$$

2.5. При напряженности электрического поля  $\dot{A}_{ост}$  все свободные электроны перейдут в минимум 2 (см. рис. 2.3, в), и при дальнейшем повышении напряженности плотность тока будет возрастать линейно (см. рисунок 2.4, область 3).

$$j = q\mu_2 n_0 \dot{A}. \quad (2.6)$$

Однако, так как  $\mu_2 < \mu_1$ , наклон зависимости  $j(t)$  в области 1 (см. рисунок 2.4) будет меньше, чем в области 3.

2.6 Выражение (2.4) можно записать в виде

$$j = qn_0 \frac{(\mu_1 n_1 + \mu_2 n_2)}{n_0} \cdot \dot{A} = qn_0 \mu_{эфф} \dot{A}, \quad (2.7)$$

где

$$\mu_{эфф} = \frac{(\mu_1 n_1 + \mu_2 n_2)}{n_0}. \quad (2.8)$$

Эффективная подвижность электронов ( $\mu_{эфф}$ ) зависит от напряженности электрического поля. Вид зависимости  $\mu_{эфф}(\dot{A})$  представлен на рисунке 2.5.

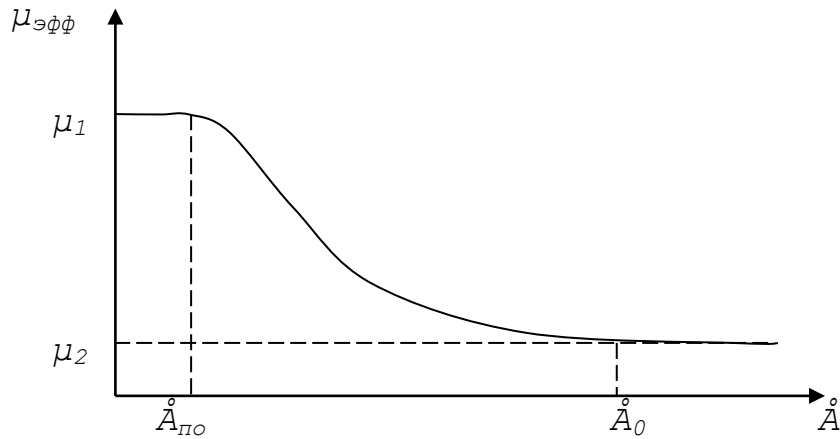


Рисунок 2.5 – Зависимость эффективной подвижности электронов от напряженности электрического поля

### 3 ДОМЕННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ

Полупроводниковые материалы обычно неоднородны по удельному сопротивлению. Пусть в образце на расстоянии  $x_0$  от катода (рисунок 3.1, а) существует область повышенного сопротивления шириной  $\Delta x$ . Напряженность электрического поля в этой области будет выше, чем в других частях образца (рисунок 3.1, б, кривая 1), и именно здесь, в первую очередь, напряженность электрического поля достигнет значения  $\dot{A}_{пор}$  при постепенном увеличении внешнего напряжения. Вследствие снижения подвижности при  $\dot{A} > \dot{A}_{пор}$  электроны в слое  $\Delta x$  медленно перемещаются к аноду. Скорость их дрейфа  $v_{др2} = \mu_2 \dot{A}_{дом}$ , где  $\dot{A}_{дом}$  – напряженность поля в домене. Справа и слева от области  $\Delta x$  с более высокой скоростью  $v_{др1} = \mu_1 \dot{A}_в$  дрейфуют электроны с эффективной массой  $m_1^*$ , где  $\dot{A}_в$  – напряженность поля вне домена. Легкие электроны слева от слоя  $\Delta x$  догоняют зону тяжелых электронов, а справа электроны, вышедшие из области  $\Delta x$ , переходят в первую долину, приобретают большую подвижность и уходят вперед. В результате на участке от  $x_1$  до  $x_2$  (рисунок 3.1, в) создается отрицательно заряженный слой с повышенной концентрацией электронов и примыкающий к нему положительно заряженный обедненный электронами слой. Эта область двойного заряда называется доменом.

Возникновение домена сопровождается перераспределением электрического поля. При этом повышается напряженность электрического поля в области домена, тогда как в остальной части образца поле снижается (см. рисунок 3.1, б, кривая 2). Это приводит к выравниванию скоростей движения электронов внутри домена и вне его, то есть

$$\mu_1 \dot{A}_в = \mu_2 \dot{A}_{дом}, \quad (3.1)$$

где  $\dot{A}_{дом}$  – напряженность электрического поля в домене. Установившаяся скорость движения домена ( $v_{др}$ ) будет ниже, чем максимальная скорость дрейфа электронов в образце.

Таким образом, в момент включения внешнего напряжения (рисунок 3.2,  $t=t_0$ ) ток через образец равен  $j_{max}$ . Домен возникает у катода, где имеется высокоомный приконтактный слой. Время формирования домена очень мало (меньше  $10^{-12}$  с), поэтому ток через образец уменьшается практически мгновенно. Напряженность электрического поля вне домена ( $\dot{A}_в$ ) меньше пороговой величины (см. рисунок 3.1, б), вследствие чего второй домен образоваться не может. В течение времени  $T=L/v_{др}$  домен дрейфует к аноду и ток через образец не изменяется ( $j=j_0$ ).



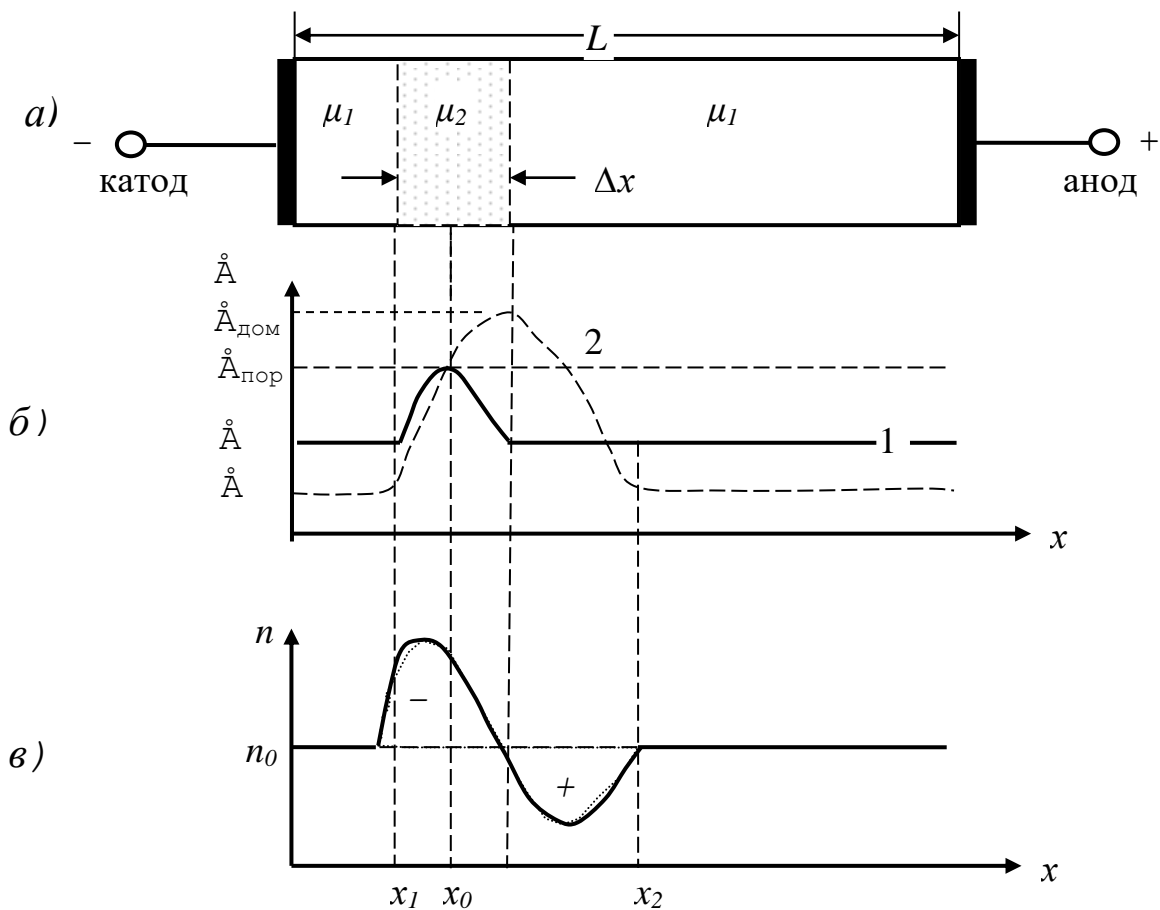


Рисунок 3.1 – а)- схема диода Ганна, где  $L$  – расстояние между катодом и анодом; б)- распределение напряженности электрического поля, где 1 – распределение поля при возникновении домена и 2- распределение поля при сформированном домене; в)- распределение концентрации электронов при формировании домена

Когда электроны домена достигают анода и уходят в него, домен разрушается, при этом ток в цепи возрастает до величины  $j_{max}$ , а напряженность электрического поля во всем образце возрастает от  $\dot{A}_в$  до  $\dot{A}_{пор}$  (см. рисунок 3.1, кривая 1). У катода образуется новый домен, и цикл повторяется. Частота колебаний тока зависит от длины образца и скорости движения домена и при  $L > 10$  мкм достигает 10 ГГц.

В данной лабораторной работе генерация СВЧ колебаний не исследуется вследствие технической сложности их наблюдений.

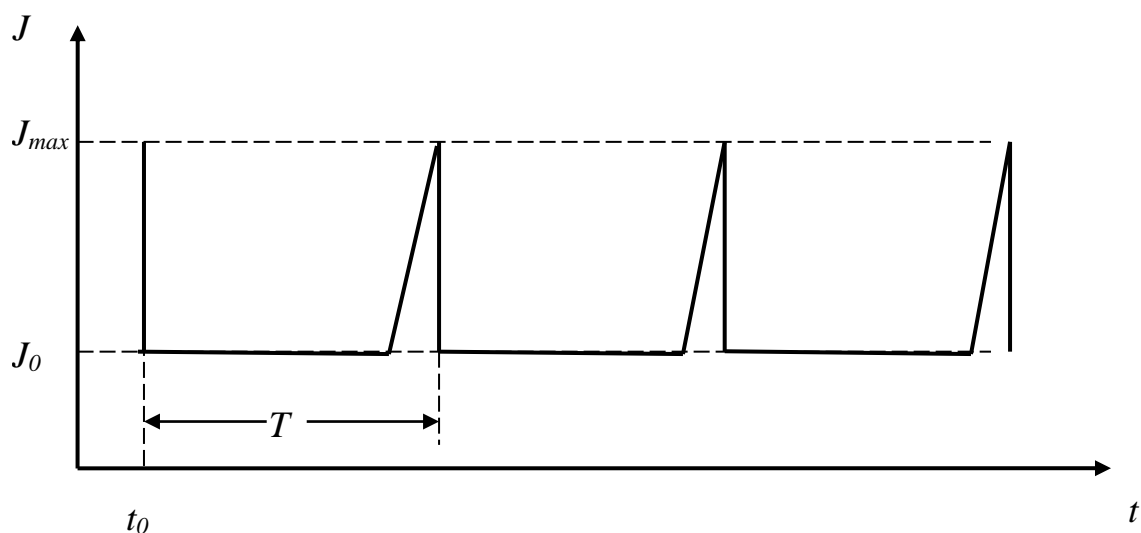


Рисунок – 3.2 Колебания тока, протекающего через диод Ганна

#### 4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.1. Собрать схему согласно рисунок 4.1.

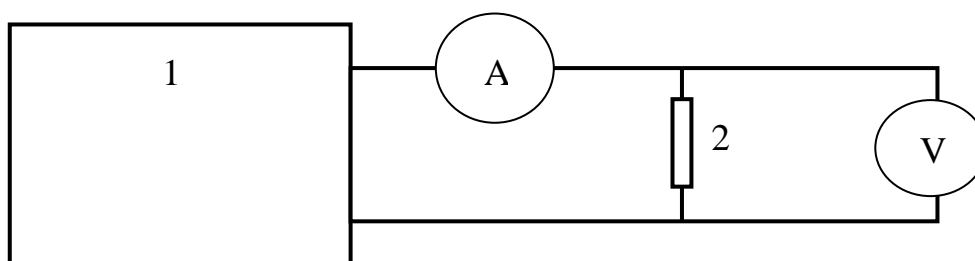


Рисунок 4.1 – Схема измерения вольтамперной характеристики диода Ганна  
(1 – источник напряжения, 2 – исследуемый диод)

4.2. Измерить вольтамперную характеристику предлагаемого диода и построить график  $J=f(V)$ ;

4.3. Рассчитать пороговую напряженность электрического поля (см. рисунок 2.4).  
Длина образца  $L=1,3 \cdot 10^{-3}$  см.

4.4. Оценить максимальную плотность тока через диод. Радиус поперечного сечения образца принять равным  $7,5 \cdot 10^{-3}$  см.

4.5. Рассчитать статическую проводимость диода ( $\sigma_{ст}$ ) для всех измеренных точек.

4.6. Рассчитать и построить зависимость эффективной подвижности электронов от напряжения на диоде.

$$\mu_{эфф} = \mu_1 \frac{\sigma_{ст}}{\sigma_0} \quad (4.1)$$

где  $\sigma_0$  – проводимость диода на участке выполнения закона Ома (см. рисунок 2.4,  $\dot{A} < \dot{A}_{пор}$ ).  
Величину  $\mu_1$  принять равной  $4500 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ .

4.7. Оценить максимальную величину отрицательного дифференциального сопротивления  $R_{диф}$  диода

$$R_{диф} = \frac{\Delta V}{\Delta J}, \quad (4.2)$$

где  $\Delta V$  -приращение напряжения;

$\Delta J$  – соответствующее приращение тока.

4.8. Рассчитать максимальное изменение подвижности.

(Теоретически  $(\mu_1/\mu_{эфф})_{max} = \frac{m_2^*}{m_1^*} \approx 17$ ).

4.9. Сделать выводы по работе.

## 5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 5.1. Почему в сильных электрических полях электропроводность арсенида галлия может уменьшаться?
- 5.2. Объясните вольтамперную характеристику диода Ганна.
- 5.3. Что такое эффективная подвижность?
- 5.4. Охарактеризуйте процесс образования домена.
- 5.5. Объясните природу СВЧ колебаний тока в диоде Ганна.
- 5.6. Почему колебания тока наблюдаются при напряженности электрического поля выше порогового значения?
- 5.7. Почему в образце не возникает одновременно более одного домена?
- 5.8. Какое практическое применение имеют диоды Ганна?
- 5.9. Как рассчитать пороговую напряженность электрического поля, максимальную плотность тока, наибольшее изменение подвижности носителей заряда?

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: 1980. - 347 с.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: Пер. с англ./Гергель В. А., Ракитин В. В. – 2-е издание, переработанное и дополненное. М.: Мир, кн.2, 1984. - 456 с.
3. Несмелов Н.С. Общие требования и правила оформления отчета о лабораторной работе. Томск, 2007, 16 с.