

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
Кафедра конструирования узлов и деталей радиоэлектронной  
аппаратуры  
(КУДР)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ГАННА

Руководство  
к лабораторной работе по курсу « Физические основы микро-  
и наноэлектроники» для студентов специальности «Кон-  
струирование и производство радиоэлектронных средств»

Разработчик  
доцент каф. КУДР \_\_\_\_\_ М.М Славникова

2015 г.

## 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 (рис.2.1)

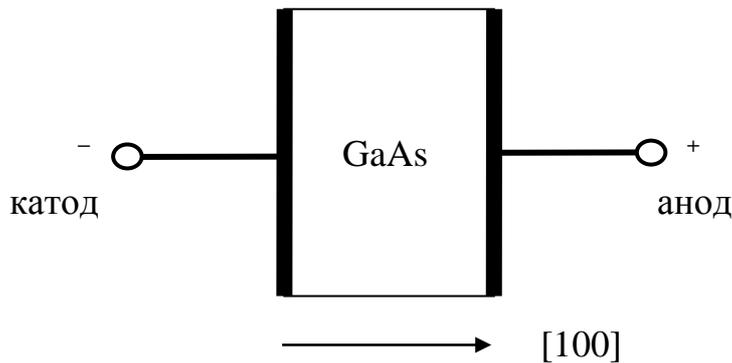


Рис. 2.1 Схематическое изображение диода Ганна.

2.2. Структура энергетических зон арсенида галлия показана на рис. 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.

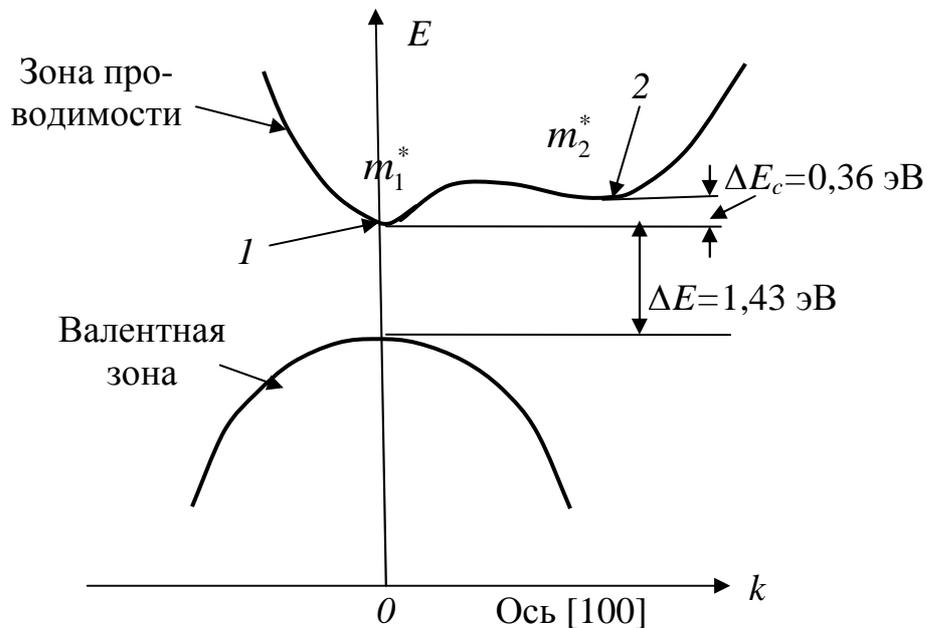


Рис. 2.2 Структура энергетических зон арсенида галлия.

(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  $\mathcal{E}$  в полупроводнике все свободные электроны находятся в минимуме 1 (рис. 2.3, а, штриховка показывает заполнение долины электронами). При этом плотность тока через

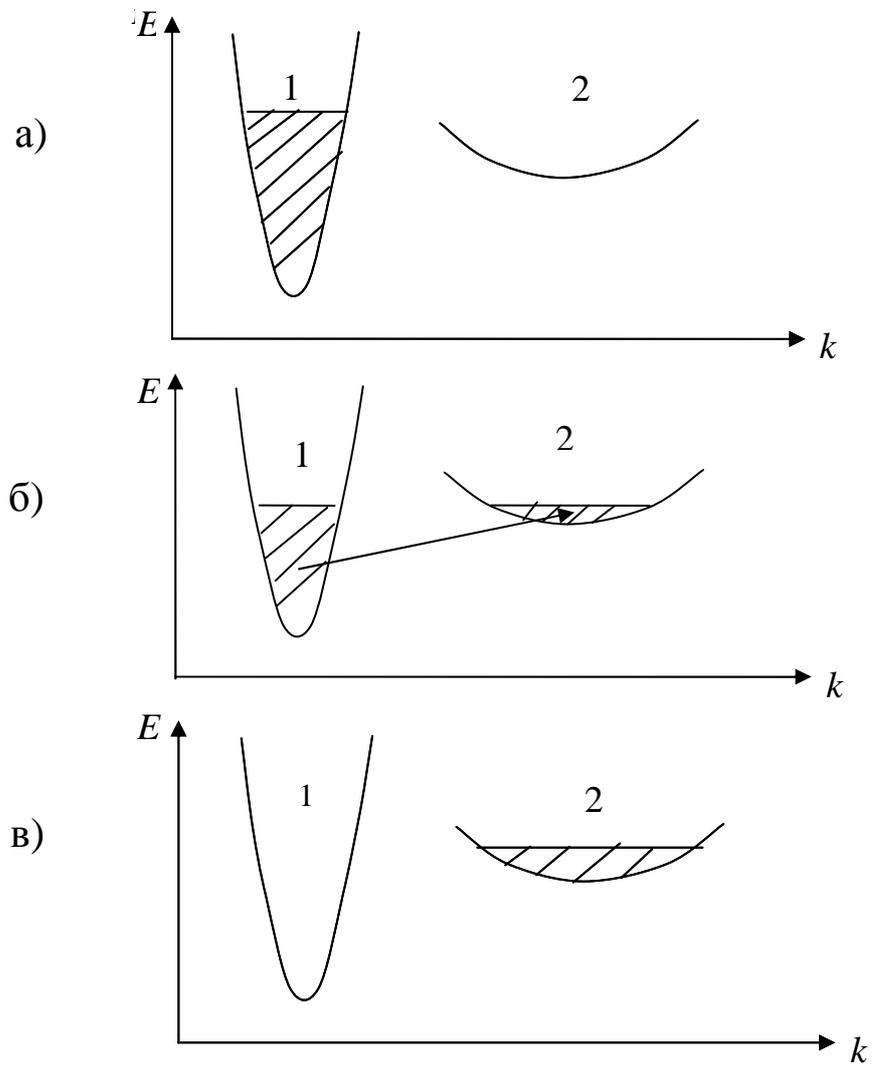


Рис. 2.3 Распределение электронов по минимумам зоны проводимости при различной напряженности электрического поля

а)  $\mathcal{E} < \mathcal{E}_{пор}$ , б)  $\mathcal{E}_{пор} < \mathcal{E} < \mathcal{E}_{ост}$ , в)  $\mathcal{E} > \mathcal{E}_{ост}$ .

диод линейно увеличивается с ростом напряженности в соответствии с законом Ома (рис.2.4, область 1):

$$j = q\mu n_0 \mathcal{E}, \quad (2.3)$$

где  $q$  - заряд электрона;

$n_0$  - концентрация свободных электронов в полупроводнике;

$\mathcal{E}$  - напряженность электрического поля.

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

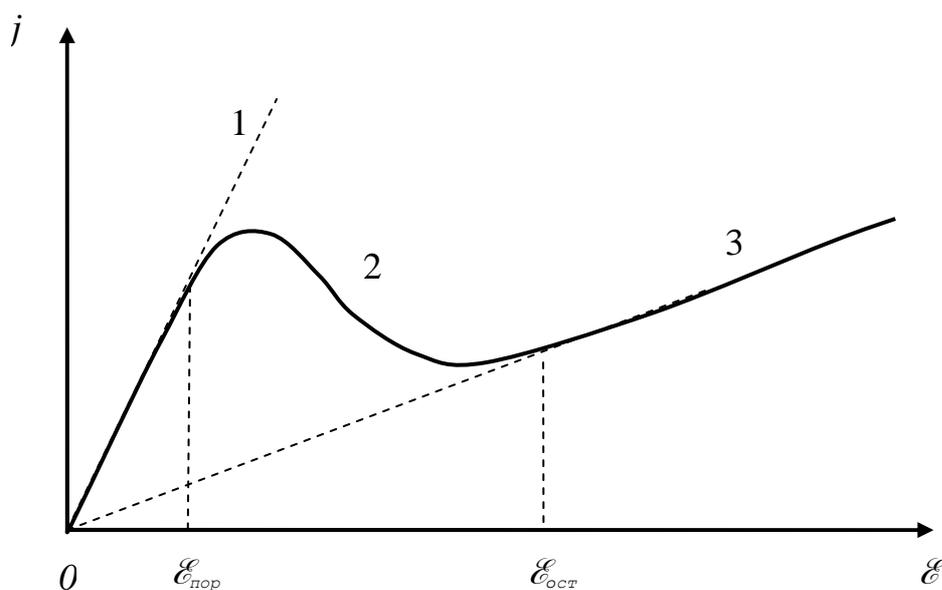


Рис. 2.4 Зависимость плотности тока от напряженности электрического поля для диода Ганна

$$(1 - j = q\mu_1 n_0 \mathcal{E}, 2 - j = q\mu_1 n_1 \mathcal{E} + q\mu_2 n_2 \mathcal{E}, 3 - j = q\mu_2 n_2 \mathcal{E}).$$

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

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

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  $\mathcal{E}_{\text{ост}}$  все свободные электроны перейдут в минимум 2 (см. рис. 2.3, в), и при дальнейшем повышении напряженности плотность тока будет возрастать линейно (см. рис. 2.4, область 3).

$$j = q\mu_2 n_0 \mathcal{E} \quad (2.6)$$

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

2.6 Выражение (2.4) можно записать в виде

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

где

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

Эффективная подвижность электронов ( $\mu_{\text{эфф}}$ ) зависит от напряженности электрического поля. Вид зависимости  $\mu_{\text{эфф}}(\mathcal{E})$  представлен на рис.2.5.

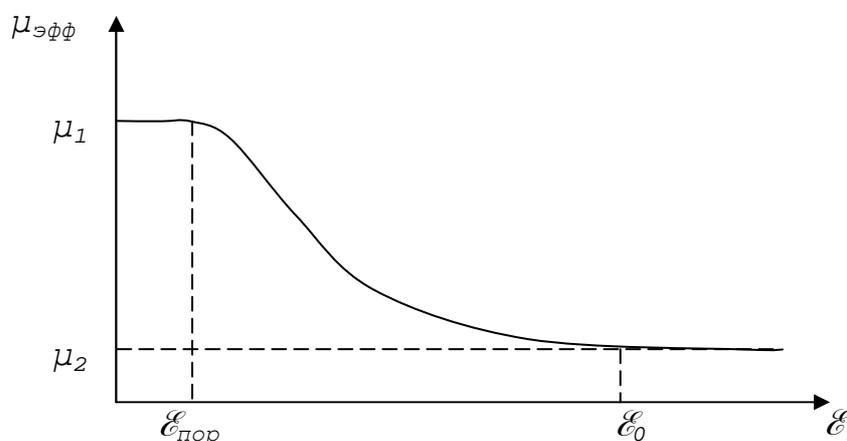


Рис.2.5 Зависимость эффективной подвижности электронов от напряженности электрического поля.

### 3. ДОМЕННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ.

Полупроводниковые материалы обычно неоднородны по удельному сопротивлению. Пусть в образце на расстоянии  $x_0$  от катода (рис. 3.1, а) сущест-

вует область повышенного сопротивления шириной  $\Delta x$ . Напряженность электрического поля в этой области будет выше, чем в других частях образца (рис.3.1, б, кривая 1), и именно здесь, в первую очередь, напряженность электрического поля достигнет значения  $\mathcal{E}_{пор}$  при постепенном увеличении внешнего напряжения. Вследствие снижения подвижности при  $\mathcal{E} > \mathcal{E}_{пор}$  электроны в слое  $\Delta x$  медленно перемещаются к аноду. Скорость их дрейфа  $v_{др2} = \mu_2 \mathcal{E}_{дом}$ , где  $\mathcal{E}_{дом}$  – напряженность поля в домене. Справа и слева от области  $\Delta x$  с более высокой скоростью  $v_{др1} = \mu_1 \mathcal{E}_в$  дрейфуют электроны с эффективной массой  $m_1^*$ , где  $\mathcal{E}_в$  – 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  $x_2$  (рис.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. рис. 3.1, б, кривая 2). Это приводит к выравниванию скоростей движения электронов внутри домена и вне его, то есть

$$\mu_1 \mathcal{E}_в = \mu_2 \mathcal{E}_{дом}, \quad (3.1)$$

где  $\mathcal{E}_{дом}$  - 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 (рис. 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 ( $\mathcal{E}_в$ ) меньше пороговой вели-

ЧИ

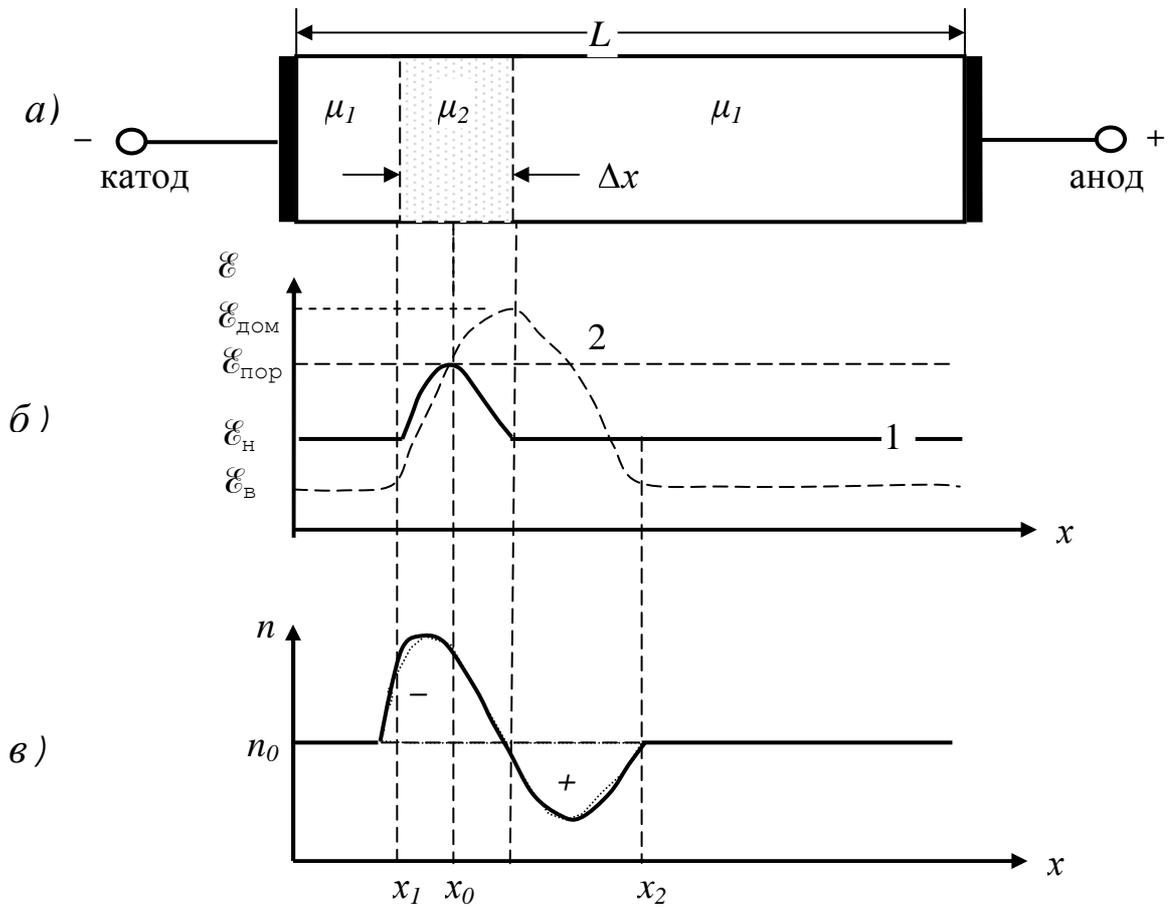


Рис. 3.1 а)- схема диода Ганна, где  $L$  – расстояние между катодом и анодом; б)- распределение напряженности электрического поля, где 1 – распределение поля при возникновении домена и 2- распределение поля при сформированном домене; в)- распределение концентрации электронов при формировании домена.

ны (см. рис.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 ( $j=j_0$ ). 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  $\mathcal{E}_B$  до  $\mathcal{E}_{\text{пор}}$  (см.

рис.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.

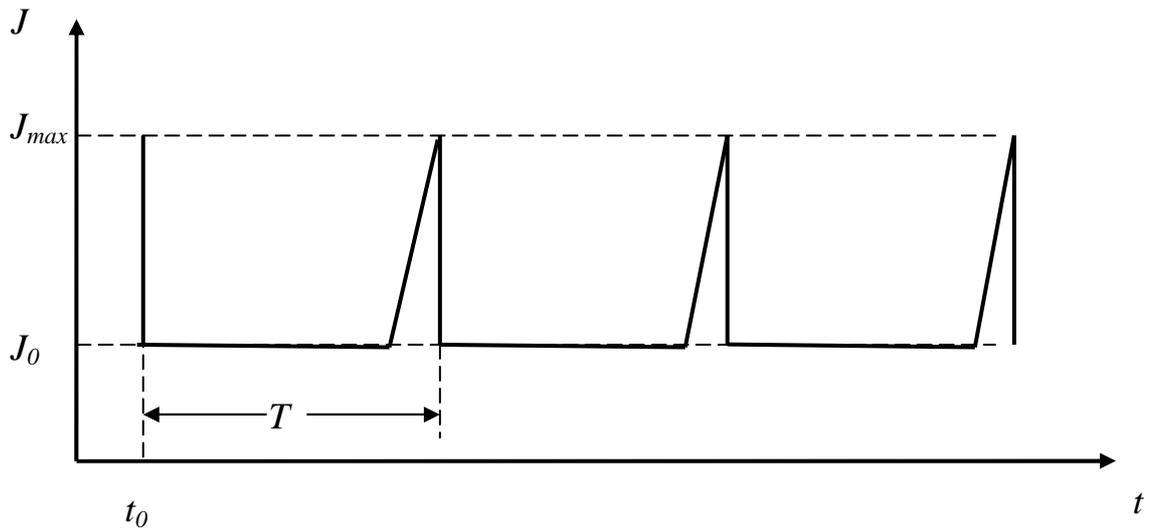


Рис. 3.2 Колебания тока, протекающего через диод Ганна.

#### 4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

- 4.1. Собрать схему согласно рис. 4.1.
- 4.2. Измерить вольтамперную характеристику предлагаемого диода и построить график  $J=f(V)$ ;
- 4.3. Рассчитать пороговую напряженность электрического поля (см. рис. 2.4).  
Длина образца  $L=1,3 \cdot 10^{-3}$  см.

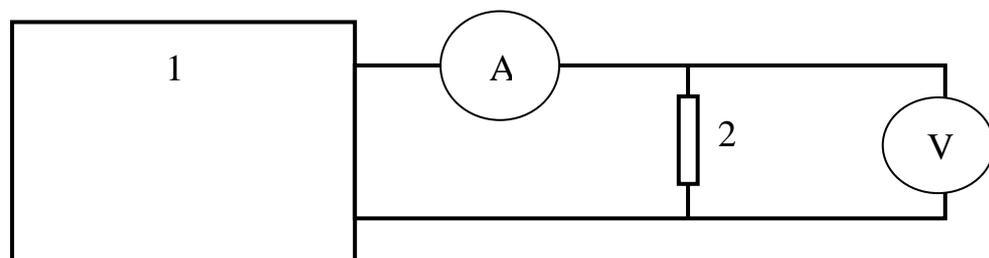


Рис. 4.1. Схема измерения вольтамперной характеристики диода Ганна (1- источник напряжения, 2- исследуемый диод).

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. рис. 2.4,  $\mathcal{E} < \mathcal{E}_{пор}$ ). 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?

## 6. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.

6.1. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов.- М.: 1980. - 347 с.

6.2. 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.

6.3. Несмелов Н.С. Общие требования и правила оформления отчета о лабораторной работе. - Томск, 2007, 16 с.