

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

---

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЧ-ГЕНЕРАТОРА НА ДИОДЕ  
С ПЕРЕНОСОМ ЭЛЕКТРОНОВ (ДПЭ)

*Лабораторная работа 2*

КУЙБЫШЕВ 1982

Министерство высшего и среднего специального образования  
Р С Ф С Р

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный  
институт имени академика С.П.Королева

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЧ-ГЕНЕРАТОРА НА ДИОДЕ  
С ПЕРЕНОСОМ ЭЛЕКТРОНОВ (ДЛЭ)

Лабораторная работа 2

Куйбышев 1982

УДК 621.396.61

Рассматриваются принцип действия и основные режимы работы генераторов на диоде с переносом электронов.

Предлагаются методика и схема экспериментального исследования характеристик генератора

Рекомендуется студентам специальности 0701.

Составитель Ю.Ф.Ш и р о к о в

Рецензенты: А.Н.Б е к р е н е в, Е.А.М у ш т а к о в

Утверждена на редакционно-издательском совете института

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЧ-ГЕНЕРАТОРА НА ДИОДЕ С ПЕРЕНОСОМ  
ЭЛЕКТРОНОВ (ДПЭ)

Ц е л ь р а б о т ы:

- 1 - ознакомление с принципом работы автогенераторов СВЧ на диодах с переносом электронов;
- 2 - снятие вольт-амперной характеристики ДПЭ и нахождение мощности СВЧ-колебаний от напряжения питания ДПЭ;
- 3 - определение диапазона механической перестройки частоты и зависимости выходной мощности от частоты генерации;
- 4 - определение зависимости частоты генерации от напряжения питания ДПЭ.

1. О с н о в н ы е т е о р е т и ч е с к и е  
п о л о ж е н и я

1.1. Физическая природа эффекта междолинного переноса  
электронов в полупроводниках и режимы работы ДПЭ

Эффект междолинного переноса электронов относится к объемным эффектам, возникающим в полупроводнике. Приборы, в основе которых лежат объемные эффекты, не содержат р-п-переходов, каких-либо других границ раздела, кроме омических (т.е. невыпрямляющих) контактов. В этих приборах используются объемные свойства полупроводникового материала для выполнения различных функций под влиянием внешних сил, например под действием магнитного или электрического полей.

Ниже рассмотрена физическая природа этого эффекта.

1.1.1. Свойства полупроводников с отрицательной  
дифференциальной проводимостью

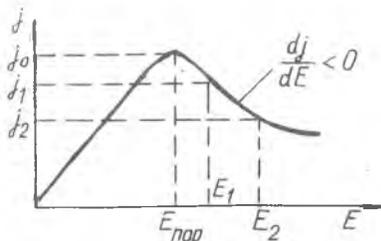
Плотность тока, текущего через объем полупроводника, пропорцио-

нальна концентрации носителей заряда  $N_0$  и их дрейфовой скорости  $V_{др}$  :

$$j = e N_0 V_{др},$$

где  $e$  - заряд электрона.

Если плотность тока  $j$  уменьшается с ростом напряженности электрического поля  $E$ , приложенного к полупроводнику, то такой полупроводник будет иметь так называемую отрицательную дифференциальную проводимость (ОДП) (рис.1).



Р и с. 1. Зависимость плотности тока  $j$  от напряженности электрического поля  $E$  для полупроводника с отрицательной дифференциальной проводимостью

Полупроводник, обладающий ОДП, имеет следующее свойство: если в объеме кристалла полупроводника возникает произвольная флуктуация концентрации носителей заряда  $\Delta N$ , избыточная по отношению к равновесной концентрации  $N_0$ , то в области кристалла, где возникла эта флуктуация, начнется нарастание пространственного заряда в пространстве и во времени.

Для более подробного рассмотрения этого свойства обратимся к рис.2, на котором схематически изображен брусок однородного полупроводника, к которому приложено напряжение  $U_0$  и который обладает отрицательной дифференциальной проводимостью при

$$U_0 > U_{нор} = E_{нор} L,$$

где  $L$  - длина полупроводникового кристалла;

$E_{нор}$  - пороговая напряженность поля, при превышении которой

$$G = \frac{dj}{dE} < 0,$$

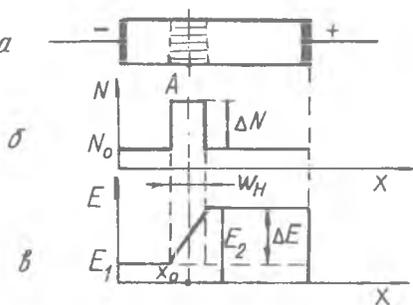
$G$  - дифференциальная проводимость кристалла.

Предположим, что в окрестности точки А существует избыточный или накопленный отрицательный заряд электронов с концентрацией  $\Delta N$  (рис.2,б), который может возникнуть вследствие шумовой флуктуации или из-за неоднородности материала кристалла.

Интегрирование уравнения Пуассона

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{e \Delta N}{\epsilon},$$

где  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость полупроводника, для начального момента времени дает распределение электрического поля в приборе (рис.2,в). Напряженность поля слева от области А ниже, чем справа от нее. Если величина  $E_1 > E_{пор}$ , то плотность электронного тока, вытекающего в область А, будет выше, чем плотность электронного тока, вытекающего из этой области. Это приведет к возрастанию избыточного пространственного заряда, поскольку, как видно из рис.1,



Р и с. 2. Распределение в кристалле полупроводника (а) концентрации заряда (б) и напряженности электрического поля (в)

при  $E_2 > E_1 > E_{пор}$ .

$$\frac{dq}{dt} = j_1 - j_2 > 0,$$

где  $q = \Delta N W_n$ ,  $W_n$  - размер флуктуации.

В результате напряженность поля  $E_2$  возрастает, а  $E_1$  падает, что следует из уравнения Пуассона, и этот процесс роста  $E_2$  и уменьшения  $E_1$  будет продолжаться до тех пор, пока величины плотностей тока  $j_1$  и  $j_2$  не сравняются, либо пока растущий слой объемного заряда не достигнет анодного контакта и не передаст свою энергию во внешнюю цепь. Поскольку неоднородность материала кристалла, на которой первоначально возник избыточный заряд  $\Delta N$ , не исчезнет, то описанный процесс накопления, перемещения растущего заряда и затем рассасывание этого заряда будет периодически повторяться, причем период равен времени движения заряда через кристалл.

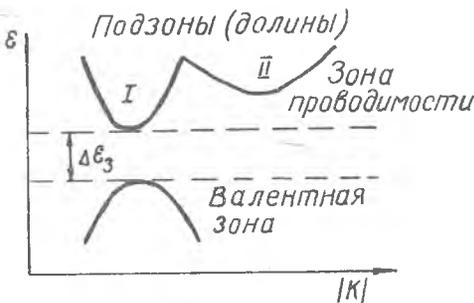
Таким образом, кристалл, обладающий отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП), может являться источником переменных колебаний тока, так как заряд, периодически рассасываясь на анодном контакте, будет вызывать периодические колебания тока во внешней цепи.

### 1.1.2. Возникновение отрицательной дифференциальной проводимости в двухдолинных полупроводниках

Уменьшение плотности тока проводимости с возрастанием напряженности электрического поля, приводящее к возникновению ОДП, может

быть вызвано либо уменьшением концентрации носителей заряда, либо уменьшением их дрейфовой скорости с ростом напряженности поля. Последнее наблюдается в полупроводниках, в которых имеет место междолинный перенос электронов. К таким полупроводникам относятся сложные полупроводниковые соединения типа  $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ , т.е. физические соединения третьей и пятой групп периодической системы элементов Менделеева, например  $GaAs$ ,  $InP$ ,  $CdTe$ ,  $InAs$ .

На рис. 3 изображена энергетическая структура двухдолинного полупроводника, которая показывает зависимость энергии электрона  $\mathcal{E}$  от модуля волнового вектора  $|K|$ .



Р и с.3. Энергетическая структура двухдолинного полупроводника

Поясним эту зависимость. Электрон движется в кристалле полупроводника, взаимодействуя с периодическим полем кристаллической решетки примерно так же, как и электромагнитная волна, проходящая через периодический  $LC$  - фильтр. Аналогия здесь очень близкая, тем более что электрон можно представить в виде электромагнитной волны. Длина

волны, связанная с движущимся электроном, определяется формулой Луиде Бройля

$$\lambda_3 = \frac{h}{m^*V},$$

где  $h$  - постоянная Планка;  
 $m^*$  - масса движущегося электрона (эффективная масса);  
 $V$  - скорость движения электрона.

Кинетическая энергия электрона как частицы определяется соотношением

$$\mathcal{E} = \frac{m^*V^2}{2}.$$

Введя модуль волнового вектора  $|K| = \frac{2\pi}{\lambda}$  и выражая импульс электрона  $p = m^*V$  через  $\lambda_3$ , получим, что энергия электрона в кристалле зависит от длины волны  $\lambda_3$ , или, иными словами, от волнового вектора  $|K|$ :

$$\mathcal{E} = \frac{m^*V^2}{2} = \frac{h^2}{2m^*\lambda_3^2} = \frac{h^2}{8\pi^2m^*|K|^2}.$$

Таким образом, если периодический  $\Delta\mathcal{E}$  - фильтр описывается его амплитудно-частотной характеристикой, то поведение электрона в полупроводнике описывается его энергетической диаграммой в координатах  $\mathcal{E}, |K|$ . Можно показать, что в идеальном периодическом кристалле могут распространяться электронные волны только определенных частот или, что одно и то же, определенных энергий, соответствующих этим частотам. Зависимость, изображенная на рис.3, определяет свойства полупроводникового кристалла как фильтра электронной волны. В этой диаграмме есть и полоса "непрозрачности" - запрещенная зона  $\Delta\mathcal{E}_z$  и полосы "пропускания" - валентная зона и зона проводимости, причем для полупроводников типа  $GaAs$  зона проводимости имеет две подзоны. Наличие второй подзоны (долины) обусловлено зависимостью эффективной массы электрона от его волнового вектора, т.е. от энергии электрона. Кривизна зависимости  $\mathcal{E}$  от  $|K|$ , как видно из зависимости (рис.3), обратно пропорциональна эффективной массе электрона

$$\frac{\partial^2 \mathcal{E}}{\partial K^2} \sim \frac{1}{m^*}.$$

Если в полупроводнике существует несколько долин проводимости с уровнями энергетических минимумов, отличающихся на величину возбуждения  $\Delta\mathcal{E}_z$ , как это имеет место в  $GaAs$ , то с увеличением энергии электронов, например, под действием внешнего электрического поля, возможен их переход из долины I в долину II, где они обладают большей эффективной массой:  $m_{II}^* > m_I^*$ . Этот междолинный перенос электронов и используется в ДИЭ. Если к кристаллу двухдолинного полупроводника приложить внешнее электрическое поле напряженностью  $E$ , то под воздействием этого поля в кристалле возникнет упорядоченное движение электронов, причем средняя скорость дрейфа электронов определяется выражением:

$$V_{др} = E(N_I \mu_I + N_{II} \mu_{II}) \frac{1}{N_0},$$

где  $N_I$ ,  $N_{II}$  и  $\mu_I$ ,  $\mu_{II}$  - соответственно концентрация электронов и их подвижность в подзонах проводимости I и II.

Поскольку подвижность электрона обратно пропорциональна его эффективной массе, то  $\mu_I \ll \mu_{II}$ .

Обозначим  $\frac{N_{II}}{N_0} = \gamma$  и учитывая, что  $N_0 = N_I + N_{II}$ , получим

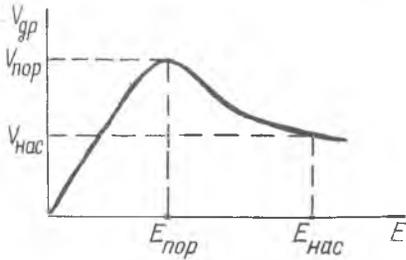
$$V_{др} = E[(1-\gamma)\mu_I + \gamma\mu_{II}].$$

При малых величинах  $E$  почти все электроны занимают подзону I, при этом  $\gamma = \frac{N_{II}}{N_0} \ll 1$ ; вторым слагаемым в квадратных скобках

можно пренебречь, и  $V_{gp} \approx \mu_I E$ .

С увеличением напряженности электрического поля возрастает энергия электронов и часть их преодолевает потенциальный барьер  $\Delta E_g$  и из долины I переходит в долину II. Величина  $\mu$  начинает быстро возрастать, и вклад первого члена резко падает, а вклад второго члена увеличивается медленно ввиду того, что  $\mu_{II} \ll \mu_I$ . При дальнейшем увеличении  $E$  почти все электроны переходят в долину II. При этом  $\mu \rightarrow I$  и  $V_{gp} = \mu_{II} E$ . Однако, при напряженностях поля, когда почти все электроны обладают энергией, заставляющей перейти их во вторую подзону, скорость их движения насыщается и стремится к  $V_{нас}$ .

Таким образом, приходим к зависимости средней скорости электронов от напряженности электрического поля, показанной на рис. 4, причем для *GaAs* величина  $E_{пор} \approx 3,2$  кВ/см.



Р и с. 4. Зависимость дрейфовой скорости электронов  $V_{gp}$  от напряженности электрического поля  $E$

Плотность тока через кристалл пропорциональна дрейфовой скорости электронов:

$$j = e N_0 V_{gp}.$$

Поэтому из-за наличия падающего участка на зависимости  $V_{gp}(E)$  в двухдолинных полупроводниках при  $E > E_{пор}$  возникает дифференциальное отрицательное сопротивление, приводящее к периодическим изменениям заряда в объеме полупроводника.

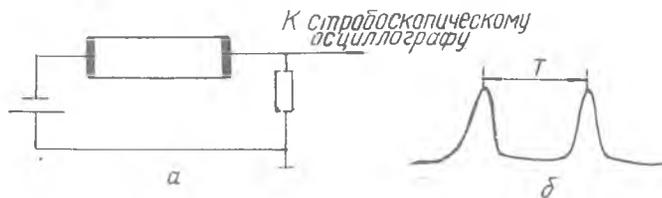
## 1.2. Режимы работы ДПЭ

Впервые описанный выше эффект был обнаружен Ганном в 1963 году и до сих пор часто называется эффектом Ганна. Схема эксперимента Ганна изображена на рис. 5.

Период колебаний тока  $T$  жестко связан с длиной кристалла  $L$  :

$$T = \frac{L}{V_{нас}}$$

Для *GaAs*  $V_{нас} \approx 10^7$  см/с, поэтому рабочая частота таких при-



Р и с. 5. Схема эксперимента Ганна (а) и форма колебаний тока в цепи при  $U_0 > U_{пор}$  (б)

боров, которые получили название диодов Ганна, или, как их теперь называют, ДПЭ, работающих в пролетном режиме, равна  $f_{пр} = \frac{100}{L}$ , где  $f_{пр}$  получается в гигагерцах, если  $L$  выражена в микрометрах; например, при  $L = 10$  мкм,  $f_{пр} = 10$  ГГц.

Однако кристалл с ОДП все-таки может быть устойчивым, т.е. не будут наблюдаться периодические процессы роста и рассасывания заряда. Дело в том, что процесс формирования областей избыточного пространственного заряда зависит от того, достаточно ли длина кристалла для образования значительного пространственного заряда за время пролета электронов через кристалл. Критерий нарастания сильной неустойчивости пространственного заряда можно легко вывести из следующих простых соображений. На начальной стадии образования пространственного заряда скорость роста заряда  $q$  определяется выражением

$$q(x, t) = q(x - v_{gp}t; 0) \exp \frac{t}{\tau_g},$$

где

$$\tau_g = \frac{\epsilon}{e N_0 |M_g|}, \quad M_g = \frac{dV_{gp}}{dE} |E > E_{пор}| < 0,$$

$x$  - текущее значение координаты области накопления заряда.

Так как эта зависимость остается справедливой в течение всего времени пролета слоя пространственного заряда через кристалл, то максимальный рост величины заряда определяется показателем экспоненты

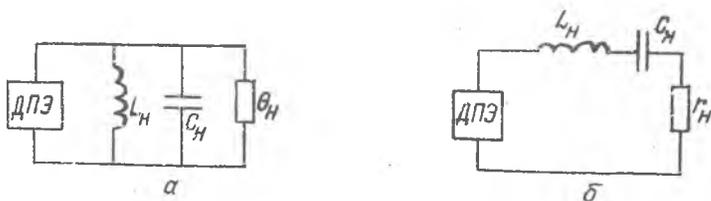
$$\frac{\tau}{\tau_g} = \frac{L}{v_{gp} \tau_g}.$$

Чтобы рост величины заряда был большим, этот показатель экспоненты должен быть больше единицы.

Это значит, что  $N_0 L > \frac{\epsilon v_{gp}}{e |M_g|}$ .

Для  $G \text{ OAS}$  типа  $\eta$  величина  $\frac{\epsilon V_{gr}}{\epsilon T \mu g} \approx 10^{12} \text{ см}^{-2}$   
 ДПЭ, кристаллы которых имеют произведение  $N_0 L < 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , ха-  
 рактеризуются стабильным распределением электрического поля и могут  
 быть использованы в качестве стабильных усилителей СВЧ-колебаний,  
 поскольку такой ДПЭ обладает отрицательной проводимостью.

ДПЭ с  $N_0 L > 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , помещенные в цепь с постоянным напряже-  
 нием, способны обеспечить формирование движущихся слоев накопления  
 заряда и работают в так называемом пролетном режиме, при котором  
 частота колебаний определяется дрейфовой скоростью электронов и дли-  
 ной кристалла. Если такой ДПЭ поместить в резонансную цепь (рис.6),  
 то начало и конец процесса рассасывания и возникновения избыточного  
 заряда будут определяться частотой резонанса внешней цепи. Поясним  
 это на примере генератора с параллельным контуром (рис.6).

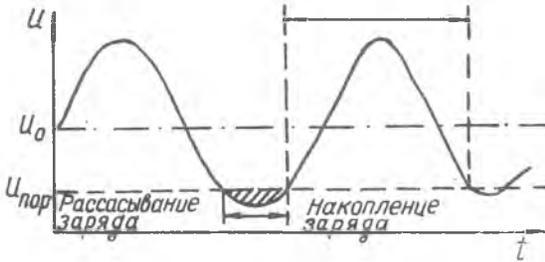


Р и с. 6. Схемы включения ДПЭ в параллельный (а) и последовательный контур (б)

Под действием периодических импульсов тока, возникших при при-  
 ложении напряжения питания  $U_0 > U_{пор}$ , будет происходить ударное  
 возбуждение колебательного контура и, как следствие, возникновение  
 гармонических колебаний напряжения на контуре, частота которых оп-  
 ределяется собственной резонансной частотой контура. Это переменное  
 напряжение прикладывается к ДПЭ, и, если добротность контура вели-  
 ка, мгновенное значение напряжения на ДПЭ может в течение некото-  
 рого интервала времени падать ниже порогового  $U_{пор}$  (рис. 7).

До тех пор, пока  $U < U_{пор}$ , избыточный заряд в кристалле возник-  
 нуть не может. Как только мгновенное напряжение на ДПЭ достигнет  
 величины  $U_{пор}$ , в кристалле начинает нарастать объемный заряд, од-  
 нако время нарастания этого заряда ограничено той частью периода  
 колебаний, когда  $U > U_{пор}$ , а это время также определяется периодом  
 свободных колебаний резонансного контура. Такой режим работы ДПЭ

иногда называют режимом с ограниченным накоплением объемного заряда (ОНОЗ).



Р и с. 7. Изменение напряжения на диоде при высокодобротной нагрузке

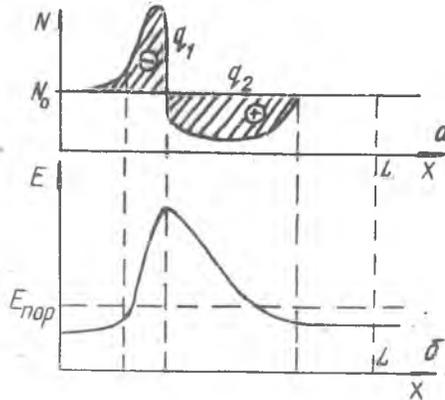
В ДПЭ возможно также существование еще одного режима генерации, при котором в объеме кристалла возникает и перемещается неоднородность пространственного заряда, содержащая не только слой, обогащенный электронами, но и обедненную область, тесно прилегающую к слою накопления заряда (рис.8).

Такая неоднородность получила название домена, а режимы работы ДПЭ, когда в кристалле имеется домен, называются доменными режимами. Суммарный заряд в домене

$$q_1 + q_2 = 0,$$

а напряженность электрического поля в кристалле при наличии домена распределяется так, как показано на рис.8,б.

Доменный режим в ДПЭ, как правило, возникает в кристаллах GaAs при  $L > 30 \text{ мкм}$  для  $N_0 = 10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$  в том случае, если вблизи контактов ДПЭ имеются значительные флуктуации профиля



Р и с. 8. Распределение концентрации электронов (а) и напряженности поля (б) вдоль образца при формировании домена сильного поля

легирования, т.е. флуктуации  $N_0$ . Поскольку флуктуации в концентрации электронов приводят к флуктуации напряженности поля, то при приложении к кристаллу внешнего постоянного напряжения  $U_0$  в области с флуктуацией  $\Delta N_0$  начинается процесс накопления заряда в той части кристалла, где  $E > E_{пор}$ , и обеднение электронами области, где  $E < E_{пор}$ .

Исходя из того что в равновесном состоянии нейтральность электронного полупроводника (по принципу Шокли) должна сохраняться, рост заряда в области накопления сопровождается падением заряда в обедненной области и возникновением сильной неоднородности электрического поля (домена). Причем, так как  $U_0 = \int_0^L E(x) dx$  увеличение напряженности поля в области домена должно сопровождаться падением напряженности поля вне домена, и эта величина напряженности поля вне домена становится меньше пороговой величины  $E_{пор}$ . Именно поэтому второй домен образоваться не может, и практически все напряжение, приложенное к ДПЭ, падает на область домена.

Распределение концентрации электронов и напряженности электрического поля в домене аналогичны тем же распределениям, которые наблюдаются в обратно смещенном р-р-переходе, как известно, эквивалентному по своим свойствам конденсатору с нелинейной емкостью. Под действием внешнего электрического поля домен движется от катода к аноду со скоростью, примерно равной  $V_{нас}$ . При достижении доменом анода происходит "разряд" емкости домена и во внешней цепи возникает импульс тока. После "разряда" домена в кристалле вновь возникает новый домен и указанный процесс формирования, движения и "разряда" домена периодически повторяется. Это приводит к возникновению периодических импульсов тока во внешней цепи, которые могут, как и в случае режима с бегущим слоем накопления заряда, возбуждать гармонические колебания, если импеданс внешней цепи имеет резонансный характер, т.е. при включении ДПЭ в колебательный контур.

При этом, если добротность контура велика, амплитуда переменного напряжения на ДПЭ может стать сравнимой с  $U_0$  и процесс формирования и "разряда" домена будет управляться этим переменным напряжением так же, как и в режиме с бегущим слоем накопления заряда, а частота генерации будет определяться частотой настройки внешней колебательной системы. Если частота настройки резонатора  $f_p$  меньше пролетной частоты  $f_{пр}$ , то домен будет рассасываться на аноде, а время возникновения домена задерживается по отношению к моменту

рассасывания. При  $f_p > f_{np}$  домен будет рассасываться не доходя до анода, так как напряжение на кристалле падает ниже порогового еще до того, как домен достигнет анода, а при  $U < U_{np}$  существование домена невозможно. Эти два режима носят название, соответственно, с задержкой образования домена и с рассасыванием домена.

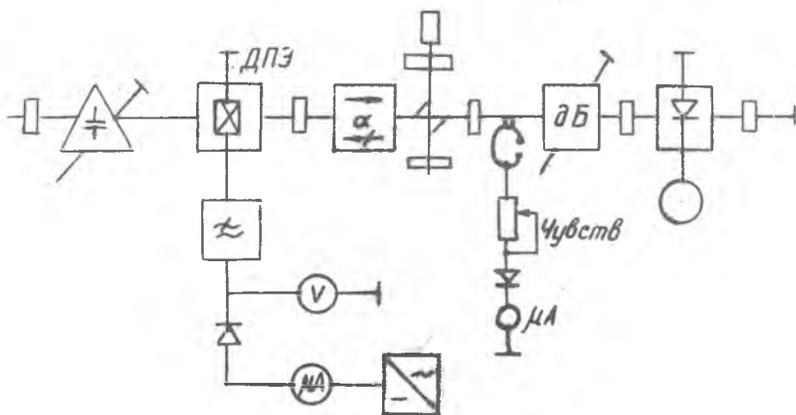
Так как доменные режимы возникают в кристаллах ДПЭ, которые могут работать на частотах порядка единиц гигагерц (дециметровый диапазон), то эти режимы подробно рассматриваться не будут, поскольку применение ДПЭ в дециметровом диапазоне нецелесообразно. Более подробно с доменными режимами ДПЭ можно ознакомиться в литературе, указанной в конце работы.

В настоящее время на частотах сантиметрового и миллиметрового диапазона используются два режима работы ДПЭ: режим генерации с бегущим слоем накопления заряда и режим усиления. Пролетный режим, обнаруженный Ганном, в указанных частотах диапазонов практически не применяется из-за низких энергетических характеристик, с одной стороны, и вследствие трудностей реализации чисто резистивной нагрузки в СВЧ-диапазоне не только на частотах, соответствующих  $f_{np}$ , но и на ее гармониках.

Таким образом частотный предел эффекта междолинного переноса электронов, а следовательно, и максимальная рабочая частота устройств, использующих этот эффект, ограничена конечным временем перехода электронов из одной подзоны в другую и примерно равна  $f_{пред} = 300$  ГГц, т.е. ДПЭ могут работать на частотах, прилегающих к субмиллиметровому диапазону волн.

## 2. Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки для исследования режимов работы генераторов на ДПЭ изображена на рис.9. Измерительный тракт, подключаемый к исследуемому автогенератору на ДПЭ, содержит ферритовый вентиль, резонансный волномер и переменный волноводный аттенуатор, служащий для изменения уровня мощности, падающей на детекторную секцию, включенную в качестве нагрузки тракта. Ток детектора, пропорциональный СВЧ-мощности, измеряется микроамперметром, подключенным к детекторной секции. Индикатором настройки волномера является микроамперметр, встроенный в волномер и измеряющий ток детектора, связанного с резонатором волномера. Чувствительность волномера



Р и с. 9. Схема лабораторной установки

регулируется переменным резистором, ось которого выведена на переднюю панель волномера (ручка ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ). Сюда же выведена ручка встроенного аттенуатора, регулирующего затухание, вносимое волномером в измерительный тракт. Напряжение питания ДПЭ  $U_0$  и потребляемого  $J_0$  осуществляется вольтметром и миллиамперметром источника питания. Для повышения точности измерений в установке могут использоваться выносные измерительные приборы.

Конструктивно автогенератор представляет собой отрезок прямоугольного волновода, сечением  $23 \times 10$  мм, закороченный с одного конца. ДПЭ типа ЗА703Б включен между широкими стенками волновода.

Перестройка частоты автогенератора осуществляется введением в резонатор автогенератора диэлектрического стержня.

Между ферритовым вентиляем и резонансным волномером в установке включен крестообразный направленный ответвитель, через который к основному тракту могут быть подключены дополнительные измерительные приборы (например, анализатор спектра, гетеродинный волномер и т.д.)

### 3. Порядок выполнения работы

#### 3.1. Снятие вольт-амперной характеристики ДПЭ по постоянному току. Определение мощности генерации от напряжения питания ДПЭ

Прежде чем приступить к эксперименту, необходимо ознакомиться с экспериментальной установкой, сопоставив ее элементы со схемой, изображенной на рис.9. После этого следует установить волноводный аттенюатор в положение, соответствующее минимальному затуханию (крайнее положение против часовой стрелки), регулятор чувствительности волномера - ручку ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ - в крайнее положение по часовой стрелке, ручку ЗАТУХАНИЕ волномера - в крайнее положение против часовой стрелки.

Включить блок питания тумблером СЕТЬ, при этом должна загореться сигнальная лампочка на передней панели блока питания. Поскольку начальное напряжение на выходе блока питания не равно нулю и составляет величину порядка 1 В, потребляемый ДПЭ ток при этом будет отличен от нуля. Если начальный ток равен нулю или превышает величину 300-500 мА, следует выключить блок питания и сообщить об этом лаборанту или преподавателю.

Изменяя напряжение питания регулятором напряжения блока питания, снять вольт-амперную характеристику ДПЭ по постоянному току. При этом напряжение  $U_0$  изменять через 0,5 В, отмечая величину тока  $I_0$  и одновременно следя за показаниями микроамперметра, подключенного к детекторной секции. Отметить величину напряжения питания, соответствующую пороговому значению, по небольшому резкому уменьшению тока  $I_0$  после короткого участка насыщения тока, а также по возникновению СВЧ-колебаний, отмеченному отклонением стрелки микроамперметра, измеряющего ток детектора  $I_d$ . При дальнейшем изменении  $U_0$  от  $U_{пор}$  до 12 В через 0,5 В отмечать величину тока  $I_0$  и тока  $I_d$ , пропорционального генерируемой СВЧ-мощности. В случае зашкаливания стрелки микроамперметра, измеряющего ток  $I_d$ , следует установить затухание волноводного аттенюатора равным 10 дБ, а показания микроамперметра умножить на 10. Результаты измерения занести в табл.1.

Т а б л и ц а I

$U_0 < U_{пор}$	$U_0, В$	
	$I_0, мА$	
$U_0 \geq U_{пор}$	$U_0, В$	
	$I_0, мА$	
	$I_D, мкА$	
	$\rho \sim I_D$	

По данным табл. I построить на одном графике зависимость постоянной составляющей тока  $I_0$  от напряжения  $U_0$  и в относительных единицах - зависимость мощности генерации  $\frac{P}{P_{\max}}$  от напряжения  $U_0$ . Отметить на графиках величину  $U_{пор}$  и область оптимальных напряжений питания  $U_0$ , соответствующих максимальной выходной мощности.

### 3.2. Определение диапазона механической перестройки частоты автогенератора. Зависимость мощности генерации от частоты

Установить напряжение  $U_0 = U_{пор}$ , соответствующее максимуму генерируемой мощности, но не более 12 В. Вращая головку микрометрического винта, установить его в положение, соответствующее максимальному погружению штыря настройки в резонатор. Отметить величину  $\ell$  в делениях микрометрического винта и величину  $I_D$ . По волномеру определить частоту генерации. Для этого, вращая ручку настройки волномера, добиться максимального отклонения стрелки встроенного микроамперметра (если стрелка зашкаливает, необходимо уменьшить чувствительность ручкой ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ) и произвести отсчет показаний на лимбе волномера, умножив показания на 10. Цена деления волномера различна для различных участков лимба и указана на передней панели волномера слева от лимба.

Вращая микрометрический винт, изменять глубину погружения настроечного штыря в резонатор через 0,5±1 мм и снять зависимость мощности (тока  $I_D$ ) и частоты генерации от величины  $\ell$ , измеряемой в делениях микрометрического винта. Один оборот головки микрометрического винта соответствует перемещению настроечного штыря на 0,5 мм. Максимальная величина  $\ell_{\max} = 10$  мм.

Результаты измерений занести в табл.2.

Т а б л и ц а 2

$l$	мм	
$f_0$	МГц	
$I_0$	мкА	
$\frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{м}}} = \frac{I_0}{I_{0\text{н}}}$		

По данным эксперимента построить градуировочную кривую автогенератора - зависимость частоты генерации  $f_0$  от  $l$ .

Определить диапазон механической перестройки частоты

$$\delta f = \frac{f_{0\text{макс}} - f_{0\text{мин}}}{f_{0\text{макс}} + f_{0\text{мин}}} 100\%$$

где  $f_{0\text{макс}}$ ,  $f_{0\text{мин}}$  - соответственно наибольшее и наименьшее значения частоты генератора.

Определить центральную рабочую частоту

$$f_{0\text{н}} = \frac{f_{0\text{макс}} + f_{0\text{мин}}}{2}$$

Рассчитать и построить зависимость  $\frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{м}}}$  от  $f_0$ , где  $P_{\text{н}}$  - мощность на частоте  $f_{0\text{н}}$ .

Определить максимальное изменение мощности в полосе перестройки

$$\Delta P_{\text{н}} = 10 \lg \frac{P_{\text{н макс}}}{P_{\text{н мин}}}$$

### 3.3. Определение зависимости частоты генерации от напряжения питания ДПЭ

Установить напряжение  $U_0 = 10$  В и настроить автогенератор на частоту  $f_{00} \approx f_{0\text{н}}$ . Изменяя напряжение питания в пределах  $10 \pm 2$  В, через 0,5 В снять зависимость частоты генерации и выходной мощности от  $U_0$ . Результаты измерений занести в табл.3.

Составитель Юрий Федорович Широков

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЧ-ГЕНЕРАТОРА НА ДИОДЕ  
С ПЕРЕНОСОМ ЭЛЕКТРОНОВ (ДПЭ)

Лабораторная работа 2

Редактор Л.С о к о л о в а

Техн. редактор Н.К а л е н ю к

Корректор Б.Г.Ф и л и п п о в а

Подписано к печати 30.12.82 Формат 60x84 I/16.

Бумага оберточная белая. Оперативная печать.

Усл.п.л. 1,09. Уч.-изд.л. 1,0. Тираж 200 экз.

Заказ 1418 Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный  
институт имени академика С.П.Королева, г.Куйбышев, ул.Моло-  
догвардейская, 151.

Областная тип. им.В.П.Мяги, г.Куйбышев, ул.Венцека, 60.