

ГЕНЕРАТОР НА ЛАВИННО - ПРОЛЕТНОМ ДИОДЕ

1. ВВЕДЕНИЕ

Задача знакомит с принципами работы лавинно-пролетного диода (ЛПД), с характерными особенностями СВЧ-генератора на его основе, а также с некоторыми методами измерения характеристик генераторов и с соответствующей измерительной аппаратурой.

Лавинно-пролетный диод (сокращенно ЛПД) - это одно из тех полупроводниковых устройств, принцип действия которых связан с использованием соизмеримости времени прохождения ("пролета") носителей заряда через рабочий объем прибора и периода приложенного к этому объему переменного напряжения. Реальные значения скоростей движения носителей зарядов и геометрических размеров областей, в которых происходит их взаимодействие с электрическим полем сигнала, таковы, что эта соизмеримость достигается только в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ).

В настоящее время генераторы и усилители на ЛПД являются наиболее мощными и коротковолновыми среди полупроводниковых устройств СВЧ диапазона. Выпускаемые промышленностью ГЛПД перекрывают диапазон частот от 4 до 160 ГГц, генерируя мощность от 10 до 300 мВт в непрерывном режиме и до 100 Вт в импульсном.

Для детального изучения особенностей лавинно-пролетных режимов в полупроводниковых структурах и применения этих режимов для создания различных генераторов и усилителей СВЧ диапазона может быть рекомендована литература, приведенная в конце описания [1-3]. Выполнение же настоящей задачи предполагает наличие лишь основных физических представлений о лавинно-пролетном режиме. Задача посвящена знакомству с генератором 3х-сантиметрового диапазона волн, построенном на наиболее простом, но в то же время и наиболее распространенном диоде с р-п переходом, работающем в режиме IMPATT (IMPact Avalanche and Transit Time - ударная лавина и пролетное время).

2. МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОЙ ПРОВОДИМОСТИ В ЛАВИННО - ПРОЛЕТНОМ ДИОДЕ

Для понимания принципа действия пролетных электронных приборов СВЧ диапазона (как полупроводниковых, к которым относится ЛПД, так и вакуумных), протекающие в них процессы удобно рассматривать со следующих позиций. Носители заряда, движущиеся в ускоряющем их электрическом поле, приобретают дополнительную энергию за счет источника этого поля, а движущиеся в тормозящем поле - отдают свою энергию. Если движение происходит в постоянном ускоряющем поле и действующем в том же пространстве переменном электрическом поле, то во время тормозящих полупериодов переменного поля носители будут отдавать во внешнюю цепь энергию, полученную от источника постоянного поля и из цепи переменного поля во время ускоряющих полупериодов. При постоянном количестве носителей, движущихся как во время ускоряющего, так и тормозящего полупериодов, в цепи сигнала ими будет попеременно выделяться и отбираться практически равное количество энергии, то есть в среднем за период переменного поля энергообмен с ним равен нулю. Можно изменить эту ситуацию, если каким-то способом сделать поток носителей неравномерным во времени: в

течение тормозящего полупериода переменного поля носителей движется больше, в течение ускоряющего - меньше. Тогда в среднем за период они будут преимущественно отдавать энергию в цепь переменного сигнала, получая ее от источника постоянного ускоряющего поля. Это и есть случай образования отрицательной активной проводимости.

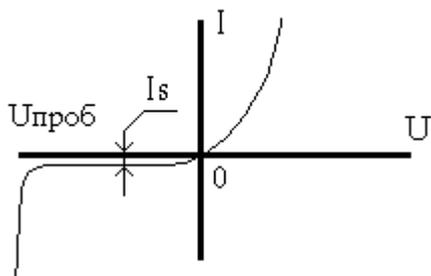


Рис.1 Вольт-амперная характеристика ЛПД

Реализовать такой "разбаланс" можно различными способами. В пролетных и отражательных клистронах это достигается за счет группировки электронов из первоначально постоянного во времени потока в сгустки и соответствующего выбора момента посылки этих сгустков в область, где действует переменное поле. В лавинно-пролетном диоде метод иной - здесь само рождение носителей зарядов не непрерывно, а может происходить, например, только в определенные интервалы времени,

повторяющиеся с периодичностью переменного поля. Это обеспечивается периодическим переходом диода в режим лавинного пробоя.

Лавинный пробой возникает в р-п переходе при определенном значении напряжения обратного смещения. На рис.1, где показана типичная характеристика диода с р-п переходом, обратному смещению соответствует левая полуплоскость. При малых напряжениях обратного смещения ток через диод отсутствует (он составляет малую величину I_s), но при достижении определенного значения $U_{пр}$ начинает резко возрастать, что в принципе может привести к разрушению диода.

Процесс пробоя связан с тем, что при достаточных напряжениях обратного смещения напряженность электрического поля в окрестности контакта п- и р- полупроводников оказывается настолько большой, что на длине свободного пробега носителей они могут приобрести энергию, достаточную для ударной ионизации атомов кристаллической решетки и образования, тем самым, новых носителей заряда. Они, в свою очередь, так же вовлекаются в процесс ударной ионизации, и в результате развивается лавинная генерация свободных зарядов, которая и приводит к резкому нарастанию тока, к пробую области р-п перехода. Если внешняя цепь позволяет ограничивать величину тока, то режим пробоя может быть устойчивым и не сопровождаться необратимыми изменениями. При этом рассмотренный механизм оказывается просто удобным способом генерации значительного количества носителей заряда непосредственно в области р-п перехода, к тому же генерации, управляемой электрическим полем (полевая инжекция зарядов).

Процесс возникновения и развития лавинного пробоя иллюстрируется на рис.2. На рис.2а схематически показана область р-п перехода, к которой приложено обратное смещение: слева, к п-полупроводнику, приложен "+", справа, к р-полупроводнику приложен "-". Под действием напряжения смещения свободные заряды покидают приграничный слой (не заштрихован), в нем остается в основном связанный заряд ионов примесей. В плоскости границы, справа и слева от которой ионы имеют разные знаки, напряженность электрического поля максимальна, а по направлению к нейтральным

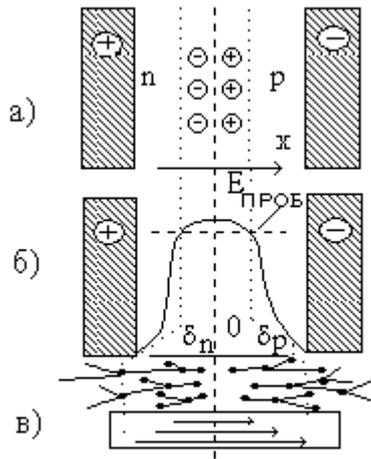


Рис.2 Возникновение лавинного пробоя

областям (заштрихованы) она постепенно спадает к нулю. Это показано на рис.2б. На нем изображен случай, когда напряжение обратного смещения больше, чем $U_{пр}$, а следовательно, вблизи границы существует область, где напряженность поля выше, чем критическое значение $E_{проб}$, обеспечивающее начало процесса ударной ионизации. В слое, где $E_0 \geq E_{проб}$ (выделено пунктиром) и развивается лавина, что позволяет назвать его **"слоем умножения"**. В нем возникает и усиливается ток носителей, который сначала перекрывает этот слой (рис.2а), а затем и остальную часть области р-п перехода, которая называется **"областью дрейфа"**.

Если к р-п переходу кроме постоянного поля обратного смещения приложено переменное электрическое поле, причем $E_{проб} > E_0$, а $E_0 + E_{\sim} > E_{проб}$ (E_{\sim} - амплитуда переменного поля), то лавина носителей будет образовываться только в интервалы времени, меньшие полупериода, а возникающие при этом носители периодически, с частотой переменного поля, будут пронизывать области дрейфа (процессы в р-области и п-области зеркально подобны, поэтому в дальнейшем достаточно рассматривать какую-нибудь из них, например п-область, где ток создается электронами). Образование каждого "пакета" носителей и, главное, - пролет этих пакетов через область дрейфа происходит не мгновенно. При соизмеримости времени пролета с периодом переменного поля и при соответствующем выборе их соотношения появляется возможность отбора энергии у движущихся носителей. Это поясняется на рис.3. На нем показаны графики движения электронов $x(t)$ (начало координат - на границе раздела). Здесь δ_n - толщина слоя умножения электронов, L_n - граница области дрейфа (см. рис.2б).

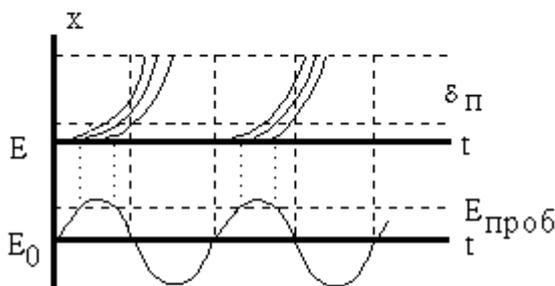


Рис.3 Процесс развития лавинного пробоя

Ниже в том же временном масштабе показана зависимость напряженности переменного электрического поля, приложенного к р-п переходу дополнительно к действующему в нем постоянному полю E_0 . Можно видеть, что рождение носителей (точки начала графиков движения) имеет место только тогда, когда суммарное поле начинает превышать величину $E_{проб}$ и прекращается, когда поле спадает и становится

меньше этой величины. Движение же зарядов в области дрейфа происходит (и заканчивается при достижении нейтральной области L_n) в основном во время тормозящего полупериода переменного поля, что приводит к преобразованию их кинетической энергии в энергию колебаний в цепи переменного сигнала. Такова

физическая природа возникновения отрицательной активной проводимости, с помощью которой обычно описывается рассмотренный эффект перекачки энергии.

Проведенное здесь рассмотрение процесса является качественным, но позволяет сделать некоторые важные выводы. Главный из них заключается в том, что отрицательная проводимость наблюдается тогда, когда время пролета носителей через соответствующую область р-п перехода близко к половине периода переменного поля. Из этих соображений и задается протяженность области перехода в диодах, предназначенных для работы на тех или иных частотах. Можно отметить так же следующее обстоятельство. Как видно из рис.3, размеры слоя умножения δ и соотношение их с размерами области дрейфа L зависят от амплитуды переменного поля: при малых амплитудах δ мало и может выполняться неравенство $\delta \ll L$.

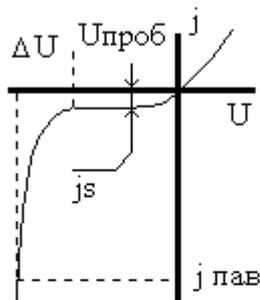


Рис. 4 Связь лавинного тока и напряжения на диоде

Такой случай "тонкого" слоя умножения или случай малого сигнала позволяет существенно упростить аналитическое рассмотрение процесса в ЛПД. Кроме того, будем считать задачу одномерной (протяженность перехода в направлении, перпендикулярном поверхности границы, много меньше его поперечных размеров) и квазистатической, поскольку протяженность перехода много меньше длины волны, соответствующей частоте переменного поля. Еще одно упрощающее обстоятельство заключается в том, что в области дрейфа скорость движения зарядов

можно считать постоянной, не зависящей от напряженности электрического поля. Такого "насыщения" скорость дрейфа для известных полупроводниковых материалов достигает при полях порядка 10^6 В/м (при меньших полях скорость пропорциональна напряженности), в режиме же лавинного пробоя поля имеют существенно большие значения, порядка 10^7 В/м.

Пренебрегая пролетными эффектами в слое умножения и учитывая их только в области дрейфа, мы, тем не менее, должны отметить, что развитие лавины требует некоторого времени. Поэтому переменная τ_L составляющая тока пробоя будет отставать от переменной составляющей приложенного к диоду напряжения на фазовый угол

$$\phi_L = \omega \tau_L \quad (1)$$

Случай малого сигнала отличается от примера, рассмотренного выше (рис.3) тем, что стабильный пробой с некоторой плотностью тока носителей j_0 здесь имеет место и в отсутствие переменного напряжения. Появление последнего здесь приводит лишь к зависящей от времени добавке в этом токе:

$$j_{\text{лав}} = j_0 + j(t) = j_0 + \bar{j} \cos(\omega t - \phi_L) \quad (2)$$

Не вдаваясь в детали механизма лавинного пробоя, анализ которого достаточно сложен, ограничимся тем, что связь лавинного тока и напряжения на диоде для $U \leq U_{\text{проб}}$ аппроксимируем функцией

$$j_{\text{лав}} = j_s (1 + \Delta U N) \quad (3)$$

где j_s - начальный ток (см. рис.1), $\Delta U = U - U_{\text{проб}}$, N - некоторый параметр, характеризующий эффективность умножения тока. Графически эта зависимость

показана на рис.4. При одновременном действии постоянного U_0 и переменного раппряжений имеем:

$$\Delta U = \Delta U_0 + u \cos \omega t \quad (4)$$

Тогда

$$\begin{aligned} j_{\text{лав}} &= j_s (1 + (\Delta U_0 N + u N \cos(\omega t - \phi_L))) = \\ &= j_s + \Delta U_0 N j_s + u N j_s \cos(\omega t - \phi_L). \end{aligned} \quad (5)$$

Пологая $j_s \ll N j_s \Delta U$, получаем:

$$j_{\text{лав}} = N j_s \Delta U_0 + N j_s u \cos(\omega t - \phi) \quad (6)$$

Отсюда амплитуда переменной составляющей плотности лавинного тока равна:

$$\bar{j} = N j_s u = j_0 / \Delta U_0 \quad (7)$$

Далее рассмотрим процессы в области дрейфа. Здесь удобно воспользоваться теоремой Рамо-Шокли о наведенном (индуцированном) токе [2], согласно которой плотность полного тока, не зависящего от координаты в цепи, в которую включен пролетный промежуток, равна сумме емкостного и наведенного токов. Наведенный же ток, в свою очередь, является усредненным по длине пролетного промежутка конвекционным (дрейфовым) током. Тогда:

$$J_{\text{полн}}(t) = \frac{\varepsilon}{L} \frac{dU}{dt} + \frac{1}{L} \int_0^L j(x, t) dx \quad (8)$$

Поскольку скорость дрейфа v считается постоянной, то $j(x, t) = j(0, t - x/v) = j(t - x/v) = j(\tau)$, где $\tau = t - x/v$ - бегущая координата. Это упрощает вычисление наведенного тока:

$$J_m(t) = \frac{1}{L} \int_0^L j(x, t) dx = \frac{1}{L} \int_0^L j(\tau) dx = \frac{v}{L} \int_{t-\tau_D}^t j(\tau) d\tau \quad (9)$$

Здесь $\tau_D = L/v$ время пролета носителей через область дрейфа. При $x=0$ имеем $j(\tau) = j_L \cos(\omega t - \phi)$ (это соответствует началу движения в области дрейфа, поскольку протяженностью слоя умножения мы пренебрегли). Поэтому:

$$\begin{aligned} J_m(t) &= \frac{v}{L} \int_{t-\tau_D}^t j \cos(\omega t - \phi_L) d\tau = \bar{j} \text{sinc} \frac{\omega \tau_D}{2} \cos(\phi_L - \omega \frac{t - \tau_D}{2}) = \\ &= \bar{j} M \cos \omega (t - (\frac{\tau_D}{2} + \tau_n)) \quad (10) \end{aligned}$$

Окончательно, учитывая выражение для \bar{j} , имеем:

$$J_m(t) = \frac{j_0}{\Delta U_0} u M \cos(\omega t - \theta) \quad (11)$$

где $\theta = (\tau_D/2 + \tau_n)$. Плотность полного тока теперь можно записать в виде:

$$J_{\text{полн}}(t) = -\frac{\varepsilon}{L} \omega u \sin \omega t + \frac{j_0}{\Delta U_0} u M \cos(\omega t - \theta) \quad (12)$$

Используя комплексную форму, получим:

$$\mathbf{J}_{\text{полн}}(t) = u e^{i\omega t} \left(\frac{j_0}{\Delta U_0} M \cos\theta - i \left(\frac{j_0}{\Delta U_0} M \sin\theta + \frac{\varepsilon}{L} \omega \right) \right), \quad (13)$$

где i - мнимая единица.

Переходя от плотности токов к токам, для чего достаточно умножить правую и левую части этого соотношения на площадь поперечного сечения перехода S , получаем:

$$\mathbf{J}_{\text{полн}}(t) = u e^{i\omega t} \left(\frac{M}{R_0} \cos\theta - i \left(\frac{M}{R_0} \sin\theta + \frac{\varepsilon S}{L} \omega \right) \right), \quad (14)$$

Здесь $R_0 = \Delta U_0 / S j_0$ - сопротивление диода по постоянному току в режиме пробоя.

Отсюда со всей очевидностью выделяется проводимость диода, как величина, определяющая пропорциональность между током и напряжением:

$$Y = \frac{M}{R_0} \cos\theta - i \left(\frac{M}{R_0} \sin\theta + \frac{\varepsilon S}{L} \omega \right). \quad (15)$$

Итак, проводимость оказывается величиной комплексной, причем ее действительная часть (активная проводимость) имеет вид:

$$G_e = \frac{M}{R_0} \cos\theta. \quad (16)$$

Она явно зависит от пролетных углов (через θ и M), то есть от соотношения времени пролета носителей и периода переменного напряжения, а мнимая часть складывается из двух частей: $B = B_e + B_c$, связанной с запаздыванием формирования лавины и переноса носителей в область дрейфа B_e (так же зависящей от пролетных углов), и чисто емкостной проводимости B_c , определяемой собственной емкостью p-n перехода:

$$B_e = \frac{M}{R_0} \sin\theta, \quad B_c = \frac{\varepsilon S}{L} \omega. \quad (17)$$

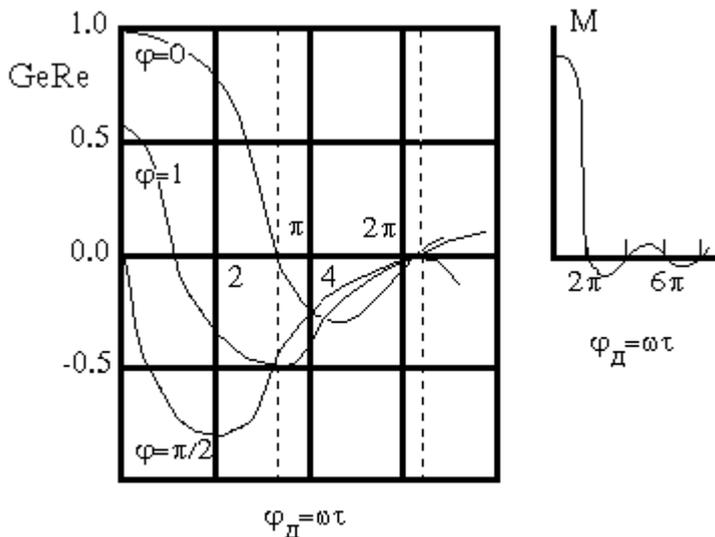


Рис.5 Зависимость проводимости от пролетного угла

Как можно видеть из выражения для G , при определенных значениях θ и M , то есть в зависимости от пролетного угла ϕ_d , активная проводимость становится отрицательной. Это иллюстрируется рис.5, где показан характер зависимости $M(\phi_d)$ и ряд кривых для G_e , рассчитанных при разных временах запаздывания лавины.

В заключение данного параграфа подчеркнем, что нами был

рассмотрен лишь наиболее простой вариант задачи о работе лавинно-пролетного

диода. Помимо обсуждавшихся допущений, связанных с предположением тонкого слоя умножения и малого сигнала, здесь не учитывается пространственный заряд, который может оказывать существенное влияние при значительных плотностях тока. Вне рамок задачи остались, естественно, и нелинейные эффекты, а также ряд других факторов, проявляющихся в работе современных эффективных ЛПД.

3. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА НА ЛАВИННО-ПРОЛЕТНОМ ДИОДЕ

Как и любое другое электронное устройство, обладающее отрицательной активной проводимостью (или, что тоже самое - отрицательным сопротивлением), ЛПД может служить основой для создания генераторов или усилителей. При этом

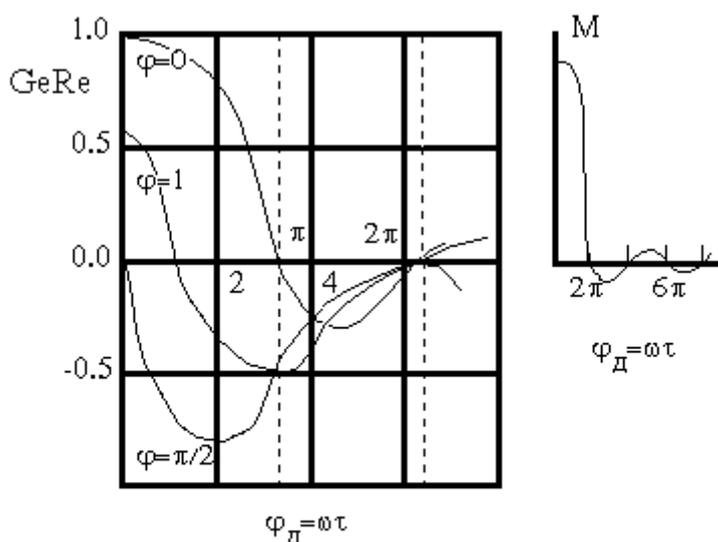


Рис.5 Зависимость проводимости от пролетного угла

диод помещается в резонансную колебательную систему, настроенную на некую заданную частоту. Значение частоты обуславливается собственными параметрами конкретного диода: совместно с ними она должна отвечать рассмотренным выше требованиям к пролетным углам. На сверхвысоких частотах в качестве таких систем используются

коаксиальные или объемные резонаторы различных конструкций. В данной задаче изучается генератор с волноводным резонатором (рис.6): короткозамкнутым с одной стороны отрезком прямоугольного волновода с подстроечным штырем, введенным в волновод с другой стороны, обеспечивающим определенную величину связи резонатора с остальным СВЧ трактом. В пучность электрического поля стоячей волны, устанавливающейся при возбуждении в резонаторе, помещается лавинно-пролетный диод. Кроме того, в том же резонаторе (иногда в связанном с ним резонаторе) помещается еще один диод - варактор, который играет роль емкости, управляемой напряжением, подаваемым на этот диод.

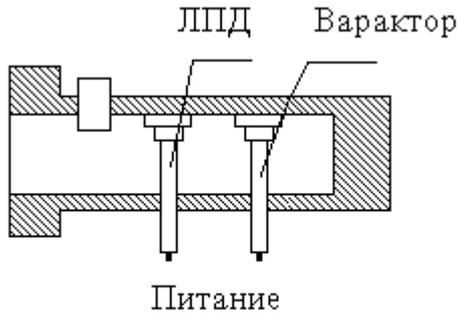


Рис.6 Волноводный резонатор

Варактором может быть диод с р-п переходом, поставленный в режим обратного смещения, но, в отличие от ЛПД, не доводимый до пробоя. В зависимости от величины напряжения смещения меняется протяженность приграничного слоя, из которого оттягиваются в нейтральные области свободные носители. При этом меняется емкость своеобразного конденсатора,

которым в данном случае служит область р-п перехода.

В связи с вышеизложенным заметим, что из выражения для реактивной емкости V_e , полученного в [1], вытекает возможность ее изменения, например, за счет изменения тока через ЛПД (ток входит в величину R_0). При этом также будет изменяться частотная характеристика резонатора, но этот способ перестройки не так удобен тем, что одновременно в той же степени будет меняться и активная проводимость, а с ней - амплитудные характеристики системы. Поэтому и возникает необходимость использования дополнительного, независимого настроечного элемента. Рассмотрение усилительного режима не входит в нашу задачу. **Генераторный же режим возникает тогда, когда выполняется общее для всех автогенераторов условие равенства нулю суммарной проводимости активных и пассивных элементов:**

$$Y_{\Sigma} = Y + Y_{\text{внеш}} = 0 \Rightarrow$$

$$G_e + G_{\text{внеш}} = 0, \quad (V_e + V_c) + V_{\text{внеш}} = 0 \quad (18)$$

Здесь Y - комплексная проводимость р-п перехода. $Y_{\text{внеш}}$ и соответственно $G_{\text{внеш}}$ и $V_{\text{внеш}}$ - комплексная проводимость внешних по отношению к активному элементу цепей и ее действительная (потери) и мнимая (реактивность) компоненты. Если равенство нулю суммы реактивных проводимостей есть условие резонанса в колебательной системе, то есть оно определяет частоту генерации, то равенство нулю суммы активных проводимостей включает в себя амплитудное и фазовое условие самовозбуждения. Смысл **фазового условия** сводится к уже обсуждавшемуся оптимальному набегу фаз в диоде, определяемому запаздыванием лавины и запаздыванием движения заряда в области дрейфа, которое обуславливает отрицательный знак активной проводимости. **Амплитудное условие** требует, чтобы активная проводимость была не просто отрицательной, но и по абсолютной величине равнялась "внешней" активной проводимости, определяемой потерями в колебательной системе и в связанном с ней тракте, передающий генерируемый сигнал "потребителю". Иными словами, **энергия, выделяемая активным элементом, должна полностью покрывать потери энергии в связанных с ним пассивных цепях.**

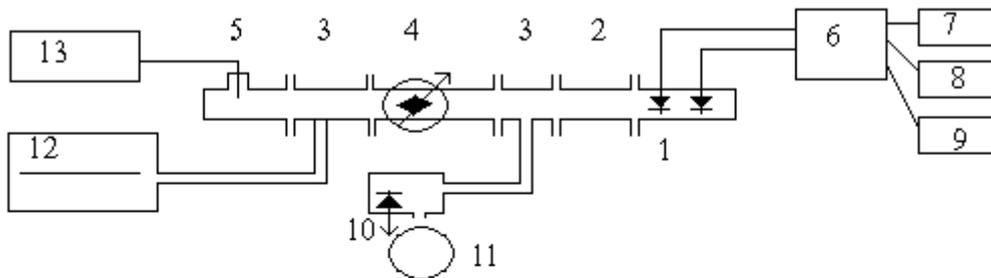
Абсолютная величина G_e при фиксированных значениях (они на заданной частоте определяются конструктивными параметрами диода и физическими свойствами полупроводникового материала) задается значением R_0 . Оно, вообще говоря, не является константой для всего режима лавинного пробоя, как это было принято в применявшейся в [1] упрощенной модели (рис.4). Но переход к описанию реальной ситуации, отражаемой например, вольт-амперной характеристикой рис.1, весьма прост: для этого достаточно рассматривать R_0 как

дифференциальное сопротивление $R_0 = 1/(dI/dU)$ ветви вольт-амперной характеристики, соответствующей пробое. При этом оно будет являться функцией тока (или напряжения) и нарастать по мере увеличения крутизны характеристики. Соответственно этому переходу от начальных токов режима пробоя к большим токам будет возрастать и абсолютное значение G_e . В тот момент, когда оно станет достаточным для выполнения равенства $G_e + G_{внеш} = 0$, и произойдет **самовозбуждение**. Значение тока через диод, при котором начинается генерация, называется **ПУСКОВЫМ** (или стартовым) током $I_{пуск}$. Это одна из важнейших характеристик генератора, обладающая большой информативной емкостью: как следует из определения, величина пускового тока отражает как потери в генераторе, так и эффективность преобразования энергии источника питания в высокочастотные колебания. Так, например, при перестройке частоты генератора с помощью варактора, когда потери могут считаться неизменными, уменьшение или увеличение пускового тока будет свидетельствовать о приближении или удалении от условий оптимальной фазы (максимальное значение, рис.5). Очевидно также, что значение пускового тока связано с такой существенной характеристикой генератора, как его КПД.

Необходимо отметить, что ни результаты упрощенной теории, рассмотренной выше, ни более детальный теоретический анализ, содержащийся в рекомендованной литературе, не обеспечивают универсальной возможности точного расчета всех основных характеристик реального ЛПД и генератора на его основе. Дело в том, что существует довольно много конструктивных и конкретных физических факторов, влияющих на количественные результаты, которые не могут быть априорно введены или определены в рамках единой аналитической задачи. Роль теоретических моделей, тем не менее, весьма существенна с точки зрения установления общих закономерностей и выявления взаимосвязи между параметрами ЛПД, генератора и режимами их работы.

4. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Используемая в задаче экспериментальная установка обеспечивает измерение вольт-амперных характеристик ЛПД, измерение мощности и частоты генерации, и определение значений пусковых токов. Схема установки показана на рис.7.



1-ГЛПД, 2-волноводный переход, 3-волноводно-коаксиальные переходы, 4-переменный аттенюатор, 5-термоэлектрическая головка измерителя мощности, 6-источник питания диодов, 7,8,9-измерительные приборы, 10-детектор контроля мощности генерации, 11-микроамперметр, 12-анализатор спектра, 13-измеритель мощности.

Рис.7 Блок-схема экспериментальной установки.

Установка позволяет производить измерения участка вольт-амперной характеристики ЛПД (ветвь, соответствующая обратному смещению, рис.1), включающего режим пробоя. Возникновение генерации регистрируется по появлению тока контрольного детектора (10), мощность генерации определяется с помощью измерителя (13) с учетом затухания, вносимого аттенюатором (4) (аттенюатор служит для развязки, то есть ослабления взаимного влияния генератора и измерительных устройств и одновременно - для предотвращения перегрузки измерителя мощности). Анализатор спектра используется для измерения частоты генерации и ее изменения при изменении электрического режима, а также при перестройке ГЛПД варактором. Он позволяет также производить наблюдение спектральной формы линии генерации.

1. *Источник питания диодов* состоит из двух независимых стабилизированных выпрямителей. Канал питания ЛПД имеет высокое внутреннее сопротивление (источник тока), что необходимо для обеспечения устойчивости работы диода в режиме пробоя. Диапазон регулировки тока 0-25 мА. Диапазон регулировки напряжения в канале питания варактора 1,6-25 В.

2. *Измеритель мощности* основан на использовании термоэлектрического датчика (термопара), в котором практически полностью поглощается мощность СВЧ сигнала и вызывает его нагрев. Возникающая при этом термо-э.д.с. подается на вход усилительного устройства и затем регистрируется в единицах, пропорциональных мощности СВЧ. **МОЩНОСТЬ СВЧ СИГНАЛА, ПОСТУПАЮЩАЯ НА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, НЕ ДОЛЖНА ПРЕВЫШАТЬ 10 мВт.** АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА представляет собой супергетеродинный приемник с тройным преобразованием частоты. Изображение на экране наблюдается в координатах "амплитуда-частота". Горизонтальный масштаб ("обзор" по частоте) может плавно изменяться в двух диапазонах: 0.10-5 МГц и 2-80 МГц. Его калибровка осуществляется с помощью меток, наносимых на изображение через 0.1 ; 1.0 ; или 10 МГц. Вертикальный масштаб может быть линейным, квадратичным (отклонение пропорционально мощности СВЧ сигнала) или логарифмическим.

ИНСТРУКЦИЯ ПО РАБОТЕ С АНАЛИЗАТОРОМ СПЕКТРА С4-27.

1. Включить блок анализатора спектра П.Ч. С4-27 и блок СВЧ. Приборы должны прогреться в течение 10-15 минут. Перед началом измерений переключатели приборов должны находиться в следующем положении:

	ЗАДАЧА ГЛПД	ЗАДАЧА ЛБВ
МЕТКИ MHz	ВЫКЛ.	ВЫКЛ.
ОБЗОР MHz	2-80	2-80
ВЕРТ. МАСШТАБ	МОЩН.	ЛОГ
ОТСЧЕТ АМПЛИТУД dB	0 dB	-49 dB
ДИАПАЗОН GHz	1.9-12	1.9-12

2. С помощью ручки | спектроанализатора установите линию развертки на уровень 0 по экранной шкале ЛИН. Ручки \leftrightarrow и разм вращать запрещается.

3. Вращая ручку НАСТРОЙКА на блоке СВЧ, установить изображение спектра сигнала по центру экрана. Частота сигнала считывается со шкалы, установленной ручкой ДИАПАЗОН GHz. Если сигнал на экране и указатель частоты на шкале GHz движутся в разные стороны, то на экране изображен зеркальный сигнал гетеродина, параметры которого не совпадают с параметрами исследуемого сигнала.

4. Более точное измерение перестройки частоты в задаче ГЛПД производится с помощью меток. Установите ручку МЕТКИ в положение 1 или 10, включив тем самым экранные метки, идущие через 1 МГц или 10 МГц соответственно. С их помощью откалибруйте горизонтальную шкалу спектроанализатора. Для повышения точности измерений переключите ручку ОБЗОР МГц в положение 0.1-5, что соответствует меньшему масштабу экрана.

ПОДГОТОВКА УСТАНОВКИ К РАБОТЕ.

1. Включите анализатор спектра и измеритель мощности (они требуют предварительного прогрева в течение 10-15 минут.)

2. Установите по шкале аттенюатора (4) затухание 20 дБ.

3. Выведите регуляторы напряжений ЛПД и варактора в крайнее положение против часовой стрелки.

4. Включите измерительные приборы (необходимые диапазоны измерений зафиксированы) и источник питания диодов.

Перед началом измерений ознакомьтесь с инструкциями по работе с измерителем мощности и анализатором спектра и в соответствии с ними проделайте необходимые подготовительные операции.

УПРАЖНЕНИЕ 1. ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

Увеличивайте отрицательное напряжение на ЛПД (напряжение на варакторе минимальное) до появления тока через диод порядка 0,1-0,2 мА. Дальнейшее увеличение напряжения рекомендуется производить через 0,1 В, регистрируя на каждой точке величину тока (максимальное значение тока 24-26 мА). Постройте график полученной зависимости тока от напряжения.

УПРАЖНЕНИЕ 2. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ И ВЕЛИЧИНЫ СТАРТОВОГО ТОКА. Вновь пройдя тот же интервал токов и напряжений и в той же последовательности, что и в первом упражнении, определите значение тока ЛПД, при котором начинается генерация (стартовый ток). Начиная с этого момента через каждые 0,1 В напряжения на ЛПД проводите отсчет мощности по шкале измерителя мощности. Рекомендуемый диапазон чувствительности "0,3 мВт". С учетом величины затухания, вносимого аттенуатором, определите соответствующие значения мощности генерации и нанесите их на тот же график, где построена вольт-амперная характеристика. Для каждой точки рассчитайте значения КПД ($KPD = P_{СВЧ} / (I \times U)$, где $P_{СВЧ}$ - мощность генерации, I и U - значения тока и напряжения через ЛПД) и постройте график зависимости КПД от напряжения U . Данное упражнение можно проводить одновременно с первым.

УПРАЖНЕНИЕ 3. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАЦИИ. Установите значение тока через ЛПД, соответствующее максимальной мощности генерации, определенной в упражнении 2. Напряжение на варакторе - минимальное. С помощью анализатора спектра определите частоту генерации $f_{ГЕН}$. Уменьшая ток через ЛПД до значения, при котором мощность генерации уменьшится вдвое, определите, на сколько уменьшится частота генерации $\Delta f_{ГЕН}$. Определите значение относительной электронной перестройки частоты $\Delta f_{ГЕН} / f_{ГЕН} \times 100\%$. Руководствуясь инструкцией по работе с анализатором спектра, определите ширину линии генерации $\delta f_{ГЕН}$ на уровне мощности, половинного от максимального, и запишите значение относительной ширины линии $\delta f_{ГЕН} / f_{ГЕН}$.

УПРАЖНЕНИЕ 4. ИЗМЕРЕНИЕ ДИАПАЗОНА ПЕРЕСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ГЛПД. Установите значение тока ЛПД, соответствующее максимальной мощности генерации. Увеличивая напряжение на варакторе (ступенями по 1-2 В) до значения $U_{вар} = 25$ В, измерьте в каждой точке частоту и мощность генерации. Постройте графики зависимости частоты и мощности от $U_{вар}$. Пользуясь тем же методом, что и в упражнении 2, измерьте стартовые токи в нескольких точках диапазона перестройки частоты, постройте график зависимости стартового тока от частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. "Электронные приборы сверхвысоких частот" под ред. В.Н.Шевчика, М.А.Григорьева, изд. Саратовского ун., 1980.
2. "СВЧ-полупроводниковые приборы и их применение", под ред. Г.Уотсона, Мир, М., 1972.
3. "СВЧ-генераторы на горячих электронах", Дж.Керолл, Мир, М., 1972.