**«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»**

**(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»)**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Факультет |  | И |  | Информационные и управляющие системы |
|  |  | шифр |  | Наименование |
| Кафедра |  | И4 |  | Радиоэлектронные системы управления |
|  |  | шифр |  | Наименование |
| Дисциплина |  | Устройства приема и преобразование сигналов | | |

КУРСОВАЯ РАБОТА

на тему

|  |
| --- |
| СВЧ генераторы на ЛПД, их конструктивные особенности |
|  |
|  |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Выполнил студент группы | | | |  | | И4М31 |
| Густов В.В. | | | | | | |
| Фамилия И.О. | | | | | | |
| **РУКОВОДИТЕЛЬ** | | | | | | |
| Тарасов А.И | |  |  | | | |
| Фамилия И.О. Подпись | | | | | | |
| Оценка |  | | | |  | |
| «\_\_\_\_\_» |  | | | | 2017 г. | |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2017г.

Содержание

[ВВЕДЕНИЕ **Ошибка! Закладка не определена.**](#_Toc498503304)

[1. Принцип действия **Ошибка! Закладка не определена.**](#_Toc498503305)

1.1 Лавинный пробой…………………………………………………………………………..

1.2 Обратная связь……………………………………………………………………………..

1.3 Фазовое условие……………………………………………………………………………

1.4 Амплитудное условие………………………………………………………………………

[2. Конструкция диода. **Ошибка! Закладка не определена.**](#_Toc498503309)

[2.1 Эквивалентная схема ЛПД **Ошибка! Закладка не определена.**](#_Toc498503310)

2.2 ЛПД как отрицательное сопротивление…………………….………………………………….

2.3 Волноводная конструкция ГЛПД……………………………………………………………….

[2.4 Эквивалентная схема генератора на ЛПД **Ошибка! Закладка не определена.**](#_Toc498503313)

3. Перестройка частоты ГЛПД

3.1 Электронная перестройка частоты…………………………….……………………………..

3.2 Перестройка частоты варикапом……….……………………………………………………

4. Параметры и их характеристики………………………………………………………………

4.1 Диапазон перестройки частоты, рабочий диапазон частот…………………………

4.2 Стабильность частоты генератора……………………………………………

4.3 Выходная мощность………………………………….

4.4 Спектральная плотность шумов (амплитудных, частотных)…………………………………

4.5 Зависимость основных параметров ГЛПД от режима работы…………………….

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ **Ошибка! Закладка не определена.**](#_Toc498503317)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ **Ошибка! Закладка не определена.**](#_Toc498503318)

## **Введение**

Лавинно-пролётный диод — это полупроводниковый прибор, работающий в режиме лавинного умножения носителей заряда при обратном смещении электронно-дырочного перехода.

Генерация СВЧ-колебаний при лавинном пробое полупроводниковых приборов впервые была обнаружена А.С. Тагером, А.Л. Мельниковым, Г.П. Кобельковым и А.М. Цебиевым в 1959 г. (диплом на открытие № 24 приоритет 27.10.1959 г.). В дальнейшем на основе обнаруженного эффекта были созданы специальные полупроводниковые приборы, получившие название лавинно-пролётных диодов (ЛПД).

До этого времени не удавалось создать эффективного автогенератора сантиметровых волн, который мог бы служить твердотельным эквивалентом одного из основных электровакуумных приборов СВЧ — отражательного клистрона. Этот пробел в значительной мере восполнил полупроводниковый СВЧ прибор — ЛПД, явившийся основой целого класса СВЧ устройств: генераторов, усилителей, преобразователей частоты, генераторов шума.

С момента создания ЛПД достигнуты существенные успехи в увеличении выходной мощности, КПД, в расширении частотного диапазона ЛПД, измерении параметров, совершенствовании методов изготовления. ЛПД изготовляют из кремния (Si), германия (Ge) и арсенида галлия (GaAs).

ЛПД работает в диапазоне частот 0,1 *…* 340 ГГц, обеспечивая мощность 6*…*8 Вт в сантиметровом диапазоне в непрерывном режиме, а мощность многодиодного генератора этого диапазона может составлять несколько десятков или даже сотен ватт. В дециметровом диапазоне мощность импульсного диодного генератора может превышать несколько киловатт. Такой уровень мощности является достаточным для использования этих приборов в радиоэлектронных системах различного назначения.

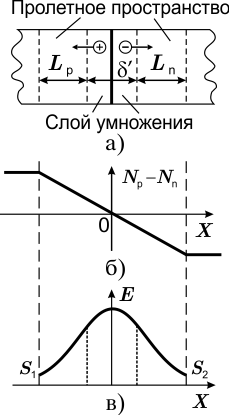
Успехи в создании промышленных образцов ЛПД открыли широкие возможности для конструирования различных СВЧ приборов и устройств и, в первую очередь, генераторов сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн. Эти генераторы, обладают значительными преимуществами пред электровакуумными приборами аналогичного назначения по габаритным размерам и массе, потребляемой мощности, долговечности и лучшей совместимости с микросхемами, получили широкое распространение в современной радиоэлектронной аппаратуре (РЭА).

### **1 Принцип действия**

* 1. ***Лавинный пробой***

Принцип действия ЛПД основан на явлении ударной ионизации и влиянии времени пролета носителей в *p–n*-переходе. В таком переходе за счет разности концентрации электронов (*Nn*) и дырок ( *Np*) на границе раздела образуется внутреннее электрическое поле, величина и форма которого зависит от структуры перехода и распределения примесей.

Схематически механизм работы ЛПД можно представить следующим образом. Рассмотрим обратно смещенный *p–n*-перехода (рисунок 6.1).



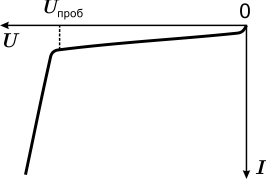
**Рисунок 6.1 - Запорный слой и поле в ЛПД**

Принцип действия ЛПД основан на явлении ударной ионизации и влиянии времени пролета носителей в *p–n*-переходе. В таком переходе за счет разности концентрации электронов (*Nn*) и дырок ( *Np*) на границе раздела образуется внутреннее электрическое поле, величина и форма которого зависит от структуры перехода и распределения примесей.

Схематически механизм работы ЛПД можно представить следующим образом. Рассмотрим обратно смещенный *p–n*-перехода (рисунок 6.1 ).

Напряженность электрического поля *E*максимальна в плоскости *x*= 0 (плоскость технологического перехода).

По мере увеличения внешнего обратного напряжения *p–n*-переход расширяется, и напряжённость электрического поля возрастает. Когда поле в плоскости технологического перехода достигает некоторого критического значения *E*= *E*кр, начинается интенсивный процесс ударной ионизации атомов кристалла, приводящий к нарастанию числа носителей, т.е. образованию новых злектронно-дырочных пар. Ток через переход резко возрастает — происходит лавинный пробой. Описанный процесс объясняет поведение обратной ветви вольт-амперной характеристики диода, приведённый на рисунке 6.2.



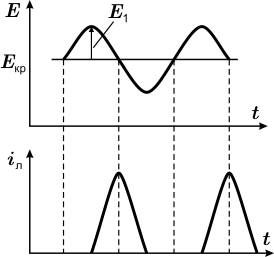
**Рисунок 6.2 - Обратная ветвь вольт-амперной характеристики ЛПД**

При напряжении выше пробивного ( *U > U*проб) обратный ток резко возрастает.

#### **1.2 Обратная связь**

Заметим, что область перехода, в которой происходит лавинное образование носителей заряда, сосредотачивается в узком слое *δ*вблизи максимума напряженности поля в соответствии с рисунком 6.1.

Эту область принято называть слоем умножения, а остальную часть перехода, где напряжённость поля недостаточна для развития лавины, — пролётным пространством. В результате лавинообразного размножения носителей заряда в *p–n*-переходе концентрация носителей в нём будет увеличиваться, что приведёт к резкому уменьшению падения напряжения на структуре, так как сопротивление структуры уменьшится. Поскольку поле станет меньше критического, лавина будет затухать. Это приведёт к росту сопротивления структуры и падение напряжения на ней начнёт расти, что снова приведёт к процессу ударной ионизации и появлению лавины. Таким образом, процесс повторяется. Налицо положительная обратная связь. В результате напряжённость электрического поля в слое меняется по гармоническому закону относительно среднего уровня *E*= *e*кр, как показано на рисунке 5.3. Скорость генерации носителей при ударной ионизации зависит не только от напряжённости электрического поля, но и от числа инициирующих носителей. Число генерируемых носителей и ток проводимости, обусловленный дрейфом этих носителей, ток лавины *i*л, стремительно нарастают к концу положительного полупериода.



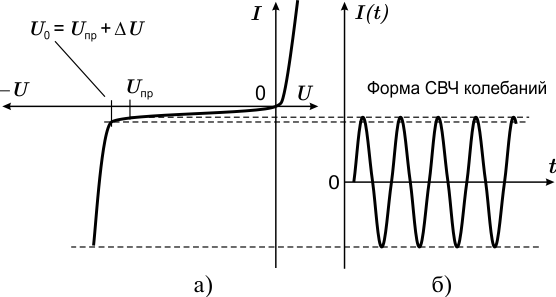
**Рисунок 6.3 - Форма лавинного тока в слое умножения**

Время, в течение которого лавинный поток зарядов успевает возникнуть и достичь электродов диода, составляет всего лишь 10-7 секунды. В течение каждой секунды лавина возникает несколько миллиардов раз, в результате чего и происходят колебание с частотой, измеряемой десятками тысяч мегагерц, которым соответствуют волны миллиметровой длины.

#### **1.3 Фазовое условие**

Однако такие волны могут появиться только в том случае, если в определённом режиме работы диода его дифференциальное сопротивление приобретает отрицательный знак. Отрицательное, же сопротивление возникает из-за того, что лавинообразный ток достигает максимальной величины в тот момент, когда волна напряжения, успев пройти через свой максимум, уже пошла на спад, т.е. ток диода запаздывает по фазе относительно переменного напряжения на его электродах.

Для реализации генераторного режима лавинно-пролётный диод устанавливают в резонатор и подают на него напряжение смещения *U*0 по величине близкое к пробивному *U*≤ *U*проб (рисунок 6.4).



**Рисунок 6.4 - Вольт-амперная характеристика диода (а) и форма СВЧ колебаний (б)**

Тогда в моменты максимального значения СВЧ поля (имеющего флуктуационное происхождение) переменное напряжение *U*~ складывается с напряжением смещения *U*0, и в отрицательные его полупериоды поле в слое умножения достигает пробивного значения

|  |  |
| --- | --- |
| E = E + E ≥ E ,  0 ~ проб | (6.1) |

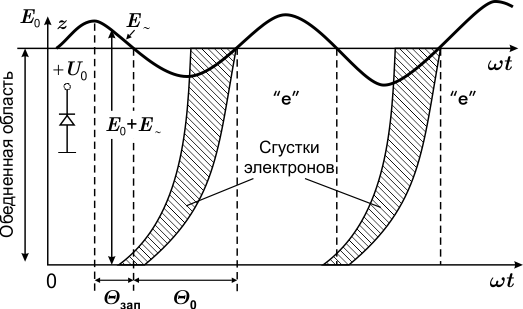
где *E*0 — напряжённость электрического поля, создаваемая напряжением смещения *U*0.

Общая напряжённость в слое умножения становится достаточной для развития лавины. Лавинная природа тока обуславливает его заметную инерционность, так как на развитие процесса лавины требуется определённое время.

Известно, что это время запаздывания *τ*з близко к четверти периода, или угол запаздывания

|  |  |
| --- | --- |
| Θ = ωt = 2 πf (T /4) = π /2  зап з | (6.2) |

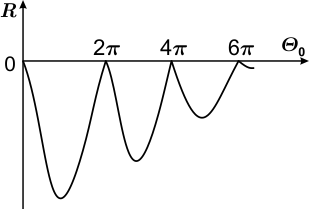
Движение носителей в ЛПД удобно проиллюстрировать с помощью пространственно-временной диаграммы, изображённой на рисунке 5.5, где *θ*0 = *ωτ*др — угол пролёта на участках *р*и *n*.



**Рисунок 6.5 - Пространственно-временная диаграмма**

При построении диаграммы учтён угол запаздывания *θ*зап = *π /*2 . Образовавшиеся сгустки носителей (электронов и дырок) перемещаются внутри *p–n*-перехода через пролётные пространства *S*1 и *S*2. (На диаграмме показано лишь движение электронов через пространство *S*2). Движение дырок можно изобразить аналогично — снизу от оси *ωt*. Заметим, что изменение координаты *z* во времени практически линейно, так как скорость дрейфа носителей в условиях *U*≈ *U*проб близка к насыщению. Таким образом, благодаря задержке в развитии лавины *θ*зап и наличию пролётного промежутка обеспечивается сдвиг по фазе на величину *θ*0 = *π* между импульсами тока и высокочастотным полем. Следовательно, сгустки электронов, сформированные в слое умножения, дрейфуют в пролётном пространстве, т.е. в обеднённой области, к катоду (плюс источника *U*0) и тормозятся во время отрицательного полупериода СВЧ поля *E*~ , отдавая во внешнюю цепь (контур генератора ) свою энергию.

Следовательно, активная составляющая сопротивления диода *R*может быть отрицательной (рисунок 6.6).

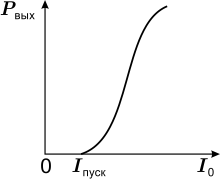


**Рисунок 6.6 - Изменение отрицательного сопротивления в ЛПД**

Это обстоятельство и обеспечивает возможность, при определенных условиях, возникновению автоколебаний. Сдвиг по фазе на величину *π*между образующимися импульсами тока и переменным высокочастотным напряжением означает, что диод в динамическом режиме обладает отрицательным сопротивлением (ОС), которое называют отрицательным динамическим сопротивлением (ОДС).

#### **1.4 Амплитудное условие**

Возбуждение СВЧ колебаний в генераторе происходит, когда отрицательное сопротивление ЛПД превысит суммарные потери в системе, включая потери в диоде, контуре и нагрузке — *R*пот. Это имеет место при токах диода, превышающих значение пускового тока (рисунок 6.7).



**Рисунок 6.7 - Зависимость выходной мощности генератора от тока ЛПД**

Пусковой ток растёт с ростом частоты. Обычно он составляет десятки и сотни миллиампер.

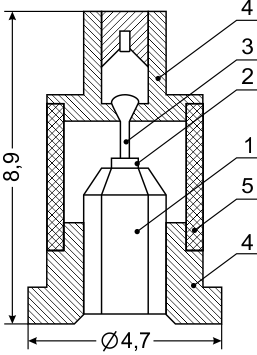
Подведём некоторые итоги.

Как было установлено выше, механизм внутренней обратной связи создаётся в ЛПД объёмным зарядом. Отставание тока от поля эквивалентно введению в обратную связь запаздывания, что существенно влияет на колебательные свойства системы. При некоторых условиях эта связь может оказаться достаточной, чтобы в диоде возникли собственные автоколебания. В этом случае диод работает как автоколебательная система, создавая в активной внешней нагрузке импульсы тока с частотой, определяемой временем запаздывания.

Таким образом, в ЛПД имеет место внутренняя обратная связь, выполняется фазовое условие и в случае выполнения амплитудного условия, т.е. когда рабочий ток *I*0 достигает значения пускового *I*пуск, в резонаторе, куда помещён ЛПД, могут возникнуть автоколебания.

1. **Конструкция диода**

Современные конструкции ЛПД имеют сравнительно небольшие габаритные размеры. Конструкция и размеры одного из стандартных корпусов ЛПД приведены на рисунке 6.8.



**Рисунок 6.8 - Структура продольного сечения ЛПД**

1. - основание для крепления структуры;
2. - полупроводниковая структура;
3. - внутренний вывод;
4. - верхний и нижний фланцы;
5. - керамический цилиндр.

Для высокочастотного ЛПД с целью уменьшения паразитных реактивностей применяются корпуса с меньшими размерами (например, диаметр керамического цилиндра 0,84 мм, а его высота всего 0,3 мм). Масса диодов находится в пределах от нескольких долей до единиц граммов.

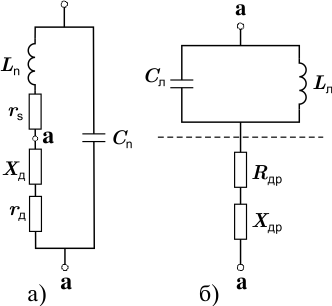
* 1. ***Эквивалентная схема ЛПД***

Приведённые выше рассуждения позволяют понять принципы построения эквивалентной схемы ЛПД. Геометрические размеры полупроводниковой структуры настолько малы, что практически во всём СВЧ диапазоне она может быть представлена схемой на сосредоточенных элементах, входное комплексное сопротивление которой

|  |  |
| --- | --- |
| Z = r + jx  д д д | (6.3) |

Эквивалентная схема ЛПД определяется электронными процессами в диодном промежутке. При воздействии на диод высокочастотного электромагнитного поля конструктивные элементы корпуса создают дополнительные реактивные сопротивления, поэтому полное сопротивление диода определяют обычно на основании эквивалентной схемы диода в корпусе (рисунок 6.9 а). В этой схеме параметры *р–n*-перехода представлены через реактивное сопротивление *X*д и активное сопротивление *r*д (а–а). Активное сопротивление потерь в полупроводниковой структуре и выводах представлено *rS*. Параметры *L*п и *C*п  — эквивалентные индуктивность и емкость корпуса и выводов.

В соответствии с рассмотренной моделью эквивалентная схема полупроводниковой структуры ЛПД представляется последовательным соединением двух участков: слоя умножения и области дрейфа (рисунок 6.9 б). Слой умножения при малой амплитуде поля может быть представлен эквивалентной схемой — параллельным колебательным контуром, содержащим индуктивность лавины *L*л и эквивалентную емкость слоя умножения *C*л (рисунок 6.9 б).



**Рисунок 6.9 - Эквивалентная схема ЛПД: а — в корпусе; б — представленная последовательным соединением двух участков**

Полное сопротивление слоя

|  |  |
| --- | --- |
| Z = 1 /Y = 1/j ωC (1 - ω /ω ),  л л л л | (6.4) |

где *ω*л = 1*/* √ ------- C лL л  — собственная резонансная частота контура, называемая лавинной частотой.

Эквивалентная схема области дрейфа при малой амплитуде поля показана на рисунке 6.9 б. Полное сопротивление области дрейфа сводится к виду

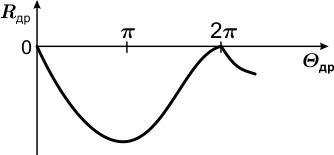
|  |  |
| --- | --- |
| Z = r + jx ,  др др др | (6.5) |

|  |  |
| --- | --- |
| где | *r*др — активное сопротивление области дрейфа; |

|  |  |
| --- | --- |
|  | *x*др — реактивное сопротивление области дрейфа. |

Активное сопротивление области дрейфа отрицательно на всех частотах *ω*= *ω*л, кроме частот, на которых *R*др = 0*,* (при *θ*= 2*πn,* *n*= 1,2 *,* *…* ).

Зависимость *R*др от угла пролёта *θ*др показана на рисунке 6.10.



**Рисунок 6.10 - Зависимость активного сопротивления слоя дрейфа ЛПД от угла пролёта**

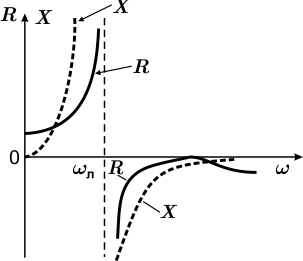
Максимум отрицательного сопротивления наблюдается вблизи *θ*др = *π*. При дальнейшем увеличении *θ*др до 2*π* сопротивление *R*др уменьшается до нуля. Видно, что диапазон частот, в котором может быть обеспечено ОС, велик.

Однако обычно считают, что ЛПД хорошо работает лишь на частотах, соответствующих углу пролёта

|  |  |
| --- | --- |
| θ = ω τ = π.  др др | (6.6) |

Таким образом, контур *L*л*C*л характеризует процессы в слое умножения, а *R*др и *X*др — процессы в слое дрейфа. Полное сопротивление ЛПД *Z*= *R*+ *jX*.

Примерная зависимость активного *R*и реактивного *X* сопротивлений от частоты показана на рисунке 6.11.



**Рисунок 6.11 - Зависимость активной и реактивной составляющих полного сопротивления ЛПД от частоты**

На частотах ниже лавинной *ω*л активное сопротивление ЛПД положительное, а реактивное имеет индуктивный характер. На частотах выше *ω*л активное сопротивление отрицательное, а реактивное становится ёмкостным. Область отрицательных сопротивлений соответствует широкому диапазону частот. Наличие отрицательного сопротивления и позволяет использовать ЛПД для создания генераторов и усилителей СВЧ.

### ***2.2 ЛПД как отрицательное сопротивление***

Диодный генератор на ЛПД (ГЛПД) состоит из полупроводникового диода и внешней относительно диода колебательной системы. При анализе генератора в динамическом режиме диод удобно рассматривать как двухполюсник с полным комплексным сопротивлением *Z*д = *r*д + *jx*д, активная составляющая которого отрицательна (ОС).

Пусть ток и напряжение на входе двухполюсника меняются по гармоническому закону с частотой *ω*= 2*πf*:

|  |  |
| --- | --- |
| i = I1 sin ωt  u = U1 sin (ωt + ϕ ) | (6.7) |

|  |  |
| --- | --- |
| где | *I*1 и *U*1 — амплитудное значение тока и напряжения; |

|  |  |
| --- | --- |
|  | *ϕ*— сдвиг фаз между током и напряжением. |

Тогда средняя за период *T*мощность, выделяемая двухполюсником

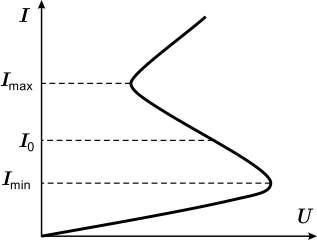
|  |  |
| --- | --- |
| ∫T  1 P д = -- iudt = 0,5I1U2 cos ϕ  T  0 | (6.8) |

и активная составляющая полного сопротивления

|  |  |
| --- | --- |
| Z = (U /I )cos ϕ + j (U /I ) sin ϕ  д 1 1 1 1 | (6.9) |

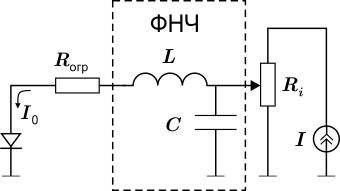
будут отрицательными при 0,5 *π*≤ *ϕ*≤ 1,5*π*. Это означает, что двухполюсник с ОС выделяет во внешнюю цепь энергию высокочастотных колебаний за счёт преобразования энергии источника питания. Таким образом, действие ОС эквивалентно включению в электрическую цепь источника колебательной мощности.

Вольт-амперная характеристика двухполюсника с ОС имеет падающий участок, расположенный между двумя участками с положительным наклоном. ЛПД имеет ВАХ *S*-типа (рисунок 6.12).



**Рисунок 6.12 - Динамическая ВАХ ЛПД**

Для диодов с ВАХ *S*-типа напряжение является однозначной функцией тока *U*= *f*(*i*). Поэтому рабочая точка *I*0 может быть установлена однозначно в пределах падающего участка ВАХ, если внутреннее сопротивление источника питания *Ri* велико ( *Ri* ≥ *r*д), что имеет место для диодов *S*-типа (источник тока). Схема подключения ЛПД к источнику питания показана на рисунке 6.13.



**Рисунок 6.13 - Схема подключения ЛПД к источнику тока**

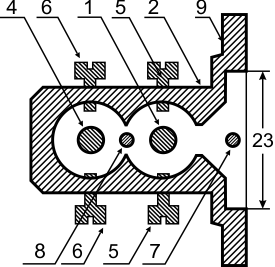
Таким образом, отрицательное сопротивление ЛПД проявляется только в том случае, если его помещают в высокочастотный резонатор, настроенный на определённую частоту, и задают ему режим лавинного пробоя. В таком режиме ЛПД является генератором СВЧ колебаний с частотами до нескольких десятков гигагерц.

В статическом же режиме сопротивление ЛПД во всём диапазоне токов и напряжений положительно. Поэтому на статической вольт-амперной характеристике ЛПД нет участков с отрицательным сопротивлением (см. рисунок 6.4).

Образование отрицательного сопротивления ЛПД возможно лишь в сравнительно узком диапазоне СВЧ и объясняется результирующим сдвигом фаз между ВЧ напряжением, приложенным к диоду, и током, наведённым во внешней цепи. На остальных частотах сопротивление положительно.

### ***2.3 Волноводная конструкция ГЛПД***

Волноводная конструкция ГЛПД применяется, как в сантиметровом, так и миллиметровом диапазоне длин волн рисунок 6.14.

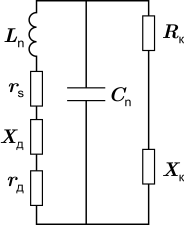


**Рисунок 6.14 - Продольное сечение волноводного ГЛПД**

ЛПД 1 размещается перпендикулярно широким стенкам волновода 2. Фланец 3 служит для присоединения к внешнему СВЧ тракту. Для получения оптимальных характеристик ГЛПД вводятся подстроечные штыри 5 и 6. Изменение связи резонатора с нагрузкой производится штырём 7, а между резонаторами — штырём 8. С помощью варикапа 4 производится электронная перестройка частоты генератора.

### ***2.4 Эквивалентная схема генератора на ЛПД***

Свойства генератора на ЛПД в сантиметровом диапазоне можно приближенно описать, используя эквивалентную схему, изображённую на рисунке 6.15 и представляющую собой сочетание описанной выше схемы ЛПД (рисунок 6.9) с параметрами внешнего контура (резонатора).



**Рисунок 6.15 - Эквивалентная схема ГЛПД**

Последний, представлен полным реактивным сопротивлением *X*к и активным сопротивлением *R*к, включающим в себя приведённое сопротивление нагрузки *X*′н и *R*′н :

|  |  |
| --- | --- |
| ′ X к = X р + X н  ′ R к = R р + R н | (6.10) |

Здесь *X*р и *R*р — реактивное и активное сопротивления резонатора.

Основную трудность при расчётах по методу эквивалентных схем вызывает определение параметров *р–n*-перехода ( *X*д , *r*д и *rs*). В общем случае эти величины представляют собой сложные функции, зависящие от рабочего тока диода *I*0, частоты *ω*, амплитуды высокочастотного поля *E*вч и свойств полупроводника (степени легирования примесями, технологии изготовления и т.д.). Однако для случая, когда ток диодов *I*0 не слишком превосходит пусковой ток *I*пуск, определяющий начало возникновения колебаний, реактивное сопротивление можно представить следующей зависимостью:

|  |  |
| --- | --- |
| X (ω, I ) = - 1/ ωC (I )  д 0 д 0 | (6.11) |

где *C*д — ёмкость *р–n*-перехода, имеющая значение в пределах 0,1*…*0,3 пФ. Формула (6.11) позволяет найти частоту генерации такого прибора. Действительно, используя уравнение стационарной частоты колебаний в виде Σ*X*= 0, получим

|  |  |
| --- | --- |
| X (ω, I ) + ωL + 1/( - ωC + 1/X ) = 0  д 0 п п к | (6.12) |

В этом выражении реактивное сопротивление резонатора принято индуктивным: *X*= *ωL*р. Связано это с тем, что при малой величине индуктивности корпуса диода (*L*п ≈ 10-9 Гн) для компенсации оставшихся двух ёмкостных сопротивлений необходима индуктивная настройка резонатора. Решение уравнения (10) можно записать в следующем виде:

|  |  |
| --- | --- |
| [ ]1/2 ω2I,п = 0, 5(ω22 + ω2р) ± 0,25 (ω22 + ω2р) - ω2Iω2р | (6.13) |

|  |  |
| --- | --- |
| где *ω*р2 = 1 */*(*L*р*C*р) – | резонансная частота промежуточного параллельного контура; |
| *ω**I*2 = 1 */*(*L*р*C*д) – | резонансная частота последовательного контура; |
| *ω*22 = *ω**I*2 (1 + *C*д */ C*п ) – | резонансная частота собственного контура диода. |

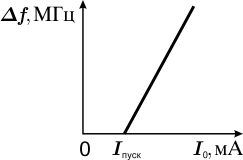
Из двух возможных значений частоты *ω**I* и *ω*п устойчивой, как правило, является низшая *ω**I* *< ω*п .

1. **Перестройка частоты ГЛПД**

***3.1 Электронная перестройка частоты***

Перестройка частоты может осуществляться путём изменения реактивных параметров контура автогенератора (см. рисунок 6.15) за счёт изменения тока питания диода *I*0.

При изменении тока питания диода *I*0 частотная модуляция проявляется как следствие зависимости реактивного сопротивления диода от тока питания *X*д (*I*0). Модуляционная характеристика (зависимость девиации частоты Δ *f*от *I*0 ) близка в этом случае к линейной (рисунок 6.16) для частот модуляции, не превышающих нескольких сотен мегагерц, а крутизна её зависит от параметров диода и добротности контура генератора. Обычно для генераторов сантиметрового диапазона крутизна характеристики составляет несколько мегагерц на миллиампер.

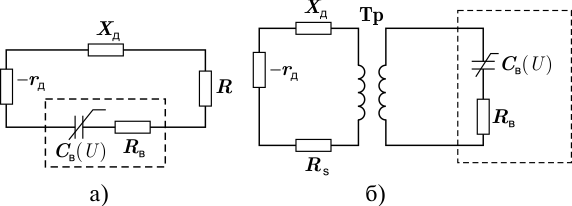


**Рисунок 6.16 - Перестройка частоты током питания**

Недостатком этого способа модуляции является относительно небольшая девиация частоты (0,15*…*0,3%) и высокий уровень паразитной амплитудной модуляции, которая возникает вследствие зависимости отрицательного сопротивления диода от тока питания и вынуждает ограничивать максимальную девиацию частоты.

#### **3.2 Перестройка частоты варикапом**

Значительно лучшие результаты можно получить при полном или частичном включении варикапа в контур генератора, что эквивалентно включению дополнительной управляемой емкости *C*в (*U*) и сопротивления потерь варикапа *R*в. При полном включении варикап включается непосредственно в контур генератора (рисунок 6.17 а) (последовательно или параллельно диоду); при частичном включении он связан с контуром генератора с помощью трансформатора связи (рисунок 6.17 б), либо специального элемента связи.



**Рисунок 6.17 - Схема включения варикапа в контур ГЛПД: а — полное; б — частичное**

При полном включении варикапа можно получить максимальную девиацию частоты, однако потери в контуре при этом сильно увеличиваются из-за сопротивления потерь варикапа, что приводит к значительному уменьшению контурного КПД и выходной мощности генератора.

Полное включение позволяет осуществить девиацию частоты 20 *…* 40 % при изменении выходной мощности не более чем на 3 дБ.

При частичном включении девиация частоты и вносимые потери зависят от степени связи варикапа с резонатором. В этом случае в сантиметровом диапазоне возможно получение девиации частоты 1 *…*5%при потерях мощности 0,5*…*0,8 дБ.

1. **Параметры и их характеристики**

***4.1 Электронная перестройка частоты***

Под рабочим диапазоном частот генератора понимается тот интервал частот, в котором прибор обеспечивает выходную мощность и другие параметры не хуже величин, указанных в технической документации. В рабочем диапазоне частот перестройка частоты генератора может осуществляться за счёт совместного или раздельного действия механической или электрической перестройки частоты. Для генераторов с фиксированной частотой диапазон частот означает, что прибор данного типа при изготовлении может быть настроен на любую фиксированную частоту в указанном диапазоне. Под диапазоном частот для перестраиваемых генераторов понимается диапазон, в котором могут изготовляться приборы этого типа с указанным диапазоном перестройки частоты (рабочим диапазоном).

Ширина диапазона перестройки частоты генератора (механической или электрической) численно характеризуется либо абсолютными величинами частоты

|  |  |
| --- | --- |
| Δf = f - f , [Г Г ц, М Г ц]  макс м ин | (6.14) |

либо относительной величиной *δf*[%]:

|  |  |
| --- | --- |
| δf = 2 ⋅ f-макс---f-мин ⋅ 100%,  f макс + f мин | (6.15) |

где *f*макс и *f*мин  — максимальная и минимальная граничные частоты диапазона перестройки частоты.

Коэффициент перекрытия диапазона

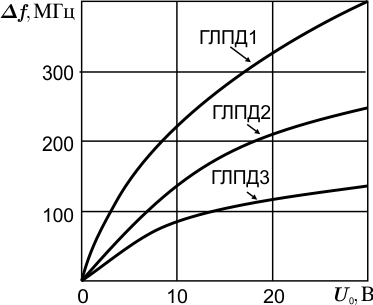
|  |  |
| --- | --- |
| K = f /f .  п ер м акс м ин | (6.16) |

Используется для оценки величины диапазона перестройки частоты.

Небольшой диапазон перестройки удобнее характеризовать в абсолютных величинах частоты (мегагерцы или гигагерцы).

Электрическая перестройка частоты генератора осуществляется изменением напряжения смещения дополнительного диода — варикапа, а также изменением напряжения на самом активном элементе. Так как зависимость ёмкости варикапа от напряжения смещения является нелинейной, то это приводит к нелинейному характеру изменения частоты генератора. На рисунке 6.18 показан характер зависимости частоты ГЛПД от напряжения смещения на варикапе *U*в.

Кроме диапазона электрической перестройки для генераторов указывается крутизна электрической перестройки частоты, которая характеризует изменение частоты генерируемых колебаний, приходящееся на 1 В изменения напряжения смещения варикапа. Если электрическая перестройка частоты имеет нелинейный характер, то указывается, либо минимальное значение крутизны перестройки, либо минимальное *S*мин и максимальное *S*макс значение крутизны.



**Рисунок 6.18 - Характер зависимости частоты ГЛПД от напряжения смещения на варикапе**

Степень искажения характеристики электрической перестройки частоты оценивается величиной перепада крутизны электрической перестройки *δS* в рабочем диапазоне частот

|  |  |
| --- | --- |
| δ = S /S .  S макс ми н | (6.17) |

#### **4.2 Стабильность частоты генератора**

Стабильность частоты является одной из главных характеристик генератора, во многом определяющая перспективы его использования.

Различают:

а) кратковременную стабильность — изменение частоты за период времени порядка нескольких секунд;

б) средневременную стабильность — изменение частоты за период времени порядка часов или температурную стабильность;

в) долговременную стабильность — изменение частоты за период времени порядка года.

Кратковременная стабильность (шумовые характеристики) определяется быстрыми изменениями в элементах генератора с одной стороны и эффективной добротностью резонатора с другой.

Средневременная стабильность определяется главным образом температурными зависимостями частоты генератора.

Долговременная стабильность связана с медленными изменениями частот, которые происходят по многим причинам.

Известно, что величины стабильности частоты и шумов существенно зависят от интенсивности воздействия на них дестабилизирующих факторов, которые по своему характеру воздействия подразделяются на внешние и внутренние и могут вызывать как обратимые, так и необратимые изменения частоты, шумов и других электрических параметров и характеристик. При этом наиболее существенными внешними дестабилизирующими факторами являются тепловые (изменения температуры окружающей среды в широких пределах), а также изменения питающих напряжений и механико-акустического воздействия.

Внутренние дестабилизирующие факторы, приводящие, как правило, к необратимым изменениям параметров, связаны с физическими, конструкторско-технологическими изменениями, происходящими в активных и пассивных приборах и конструктивных элементах. Основными и наиболее существенными факторами, приводящие к внутренним изменениям генераторов, являются интенсивные тепловые нагрузки.

В общем виде нестабильность СВЧ генераторов, вызываемую внешними и внутренними дестабилизирующими факторами, можно представить в виде

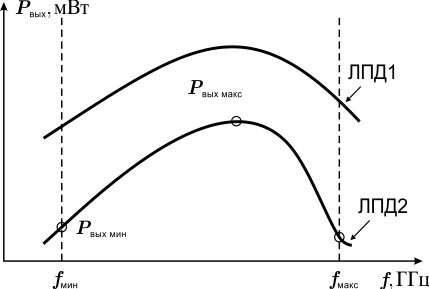
|  |  |
| --- | --- |
| ∑ n Δf /f = |Δf |/f  0 i 0  i=0 | (6.18) |

|  |  |
| --- | --- |
| где *f*0 – | фиксированная частота генератора до воздействия на него дестабилизирующих факторов; |
| Δ*f*– | общее изменение частоты генератора при воздействии на него всех дестабилизирующих факторов; |
| *i*– | количество компонент нестабильности частоты генератора, вызванных различными дестабилизирующими факторами. |

В настоящее время исследуются и разрабатываются стабильные ( 10-3 *…* 10-4 ) и высокостабильные (10-4 *…* 10-5) полупроводниковые СВЧ генераторы малой ( *<*0,1 Вт) и повышенной ( *>*0,1 Вт) выходной мощности в сантиметровом миллиметровом диапазонах длин волн.

#### **4.3 Выходная мощность**

Под выходной мощностью генератора (непрерывной или импульсной) понимается минимальное значение мощности, выделяемой на согласованной высокочастотной нагрузке, в рабочем диапазоне частот. Обычно коэффициент стоячей волны (КСВН) *ρ*внешней высокочастотной нагрузки не должен превышать 1,3. При работе генераторов на нагрузку с *ρ >*1,3 их выходные параметры могут существенно изменяться. В общем случае выходная мощность генераторов уменьшается с увеличением частот генерируемых колебаний. Это связано с физическими процессами работы генераторов. При перестройке частоты генерируемых колебаний в пределах рабочего диапазона наблюдается изменение мощности, характер которого в частотном диапазоне зависит от вида генератора и способа перестройки частоты. На рисунке 6.19 показан характер изменения уровня выходной мощности различных генераторов на ЛПД в диапазоне перестройки частоты с помощью варикапа.



**Рисунок 6.19 - Характер изменения уровня выходной мощности генераторов на ЛПД**

Изменение мощности происходит как в результате изменения отрицательного сопротивления генератора в диапазоне частот перестройки, так и из-за ухудшения согласования импеданса генератора и нагрузки.

Степень неравномерности выходной мощности при перестройке частот генераторов обычно оцениваются величиной перепада выходной мощности Δ *P*вых в диапазоне электрической (или механической) перестройки

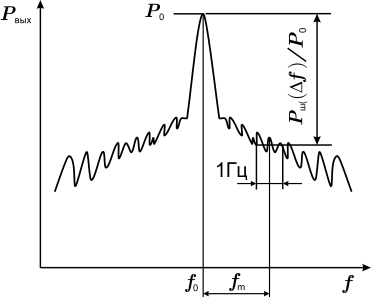
|  |  |
| --- | --- |
| ΔP = 10 lg (P /P )  вы х вы х м акс вых мин | (6.19) |

где *P*вых макс и *P*вых мин — максимальное и минимальное значение выходной мощности в диапазоне перестройки частоты.

#### **4.4 Спектральная плотность шумов (амплитудных, частотных)**

Колебания СВЧ генераторов не являются монохроматическими, т.е. спектр колебаний генераторов занимает некоторую полосу частот. Такое расширение спектральной линии генераторов обусловлено хаотическими флюктуациями носителей заряда, а также воздействием дестабилизирующих факторов (пульсаций напряжения и тока источника питания, вибрации, недостаточной экранировки, плохому заземлению и т.д.). Спектр колебаний генераторов в непрерывном режиме существенно зависит от добротности внешней колебательной системы и связи с нагрузкой. При достаточной добротности внешней колебательной системы и оптимальной связи генератора с нагрузкой наблюдается наиболее чистый спектр, близкий к спектру монохроматического колебания.

Спектр СВЧ мощности генератора является общей характеристикой фазовых шумов, которые состоят из частотно-модулированных (ЧМ-шумы) и амплитудно-модулированных шумов (АМ-шумы). Спектр содержит сигнальную линию бесконечно малой ширины и фазовые шумы (рисунок 6.20). Нарушение монохроматичности колебаний генератора связано с хаотическими флюктуациями его частоты и амплитуды (мощности), т.е. с частотными и амплитудными шумами. Они создают шумовой спектр в широкой полосе частот. Среднеквадратичные значения мощности шумов располагаются симметрично относительно несущей частоты *f*0.



**Рисунок 6.20 - Спектр СВЧ мощности генератора**

Уровень амплитудных флюктуаций генератора *N*ш(АМ) характеризуется отношением спектральной плотности мощности шума *P*ш (Δ*f*) к мощности автоколебаний *P*0. Величину *N*ш(АМ) удобнее выражать не в относительных единицах, а в децибелах

|  |  |
| --- | --- |
| ( ) N = 10 lg P /P [дБ/ Г ц],  ш(А М) ш (Δf) 0 | (6.20) |

Величину *N*ш(АМ) называют спектральной плотностью флюктуации амплитуды (мощности) или спектральной плотностью амплитудных шумов, а чаще просто величиной амплитудных шумов (АМ-шумы).

По аналогии качество генератора по ЧМ-шумам определяется отношением мощности шумов одной боковой полосы, *P*ш (Δ*f*) к полной мощности сигнала *p*0 на несущей частоте *f*0 . Это отношение берётся при отстройке *f*м от несущей в полосе Δ*f*= 1 Гц (см. рисунок 6.20), Отношение *P*ш (Δ*f*) */ P*0 показывает, на сколько децибел значение мощности шумов ниже мощности сигнала на несущей частоте.

|  |  |
| --- | --- |
| ( ) N = 10 lg P /P [дБ/ Г ц ],  ш(Ч М) ш (Δf) 0 | (6.21) |

На практике эту величину называют просто величиной частотных шумов (ЧМ-шумы). Действительная полоса Δ*f*, употребляемая при измерениях, может быть больше 1 Гц, однако для сравнения она должна быть приведена к 1 Гц.

Величины частотных и амплитудных шумов СВЧ генераторов на полупроводниковых приборах самые большие вблизи частоты автоколебаний; по мере удаления от нее значения этих шумов значительно уменьшаются. Для использования в аппаратуре важно знать, как шумы в непосредственной близости от частоты автоколебаний, так и шумы на частотах, отстоящих от основной на величину используемых в аппаратуре промежуточных частот. В первом случае обычно говорят о допплеровских шумах (диапазон 1*…*500 кГц), а во втором — о шумах на промежуточной частоте (диапазон 80*…*500 МГц).

Из СВЧ генераторов на полупроводниковых приборах наибольшими шумами обладают ГЛПД, что связано с процессом лавинного пробоя. Уровень амплитудных шумов ГЛПД на 10*…*20 дБ, а частотных на 20*…*40 дБ больше по сравнению с отражательными клистронами. Уровень шумов ГЛПД на кремниевых диодах на 5*…*10 дБ может быть больше, чем на германиевых диодах.

Остальные параметры ГЛПД не требуют специального пояснения, так как их физический смысл понятен из самого названия. Следует отметить, что допустимый уровень СВЧ источника указывается для генераторов при использовании в фазированной антенной решётке (ФАР) в качестве активного модуля и на него непосредственно может воздействовать СВЧ мощность постороннего источника.

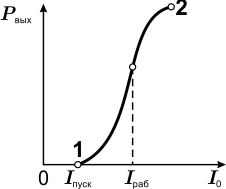
#### **4.5 Зависимость основных параметров ГЛПД от режима работы**

Параметры ГЛПД сильно зависят от тока питания. В связи с этим каждый экземпляр генератора имеет (если нет встроенного источника питания) свой номинальный ток, который указывается в паспорте на прибор. Отклонение от этого оптимального режима может привести к ухудшению параметров или даже к выходу прибора из строя.

Прежде всего, следует помнить, что все СВЧ генераторы на полупроводниковых приборах в еще большой степени, чем низкочастотные полупроводниковые приборы, чувствительны к электрическим перегрузкам. Связано это с тем, что в СВЧ полупроводниковых приборах *р–n*-переход значительно тоньше, а тепловые нагрузки значительно выше, чем у низкочастотных приборов. Поэтому превышение паспортного электрического режима даже кратковременно (доли секунды) может привести к пробою прибора.

При использовании генератора, рассчитанного на непрерывный режим, в импульсном режиме необходимо подавать импульсный ток, не превышающий ток для непрерывного режима.

Характер зависимости выходной мощности ГЛПД от тока питания показан на рисунке 6.21. При малых значениях питающего тока генерация отсутствует, и лишь по достижении некоторого пускового значения *I*пуск (точка I) начинается генерация. По мере дальнейшего роста тока питания выходная мощность увеличивается, вплоть до выхода из строя активного элемента (точка 2). От изменения тока частота генерируемых колебаний также заметно изменяется.



**Рисунок 6.21 - Зависимость выходной мощности ГЛПД от тока питания**

Поэтому для получения стабильных во времени частоты и мощности ГЛПД должны питаться от источника стабилизированного тока. Связано это с тем, что ЛПД работают на участке лавинного пробоя и небольшие изменения напряжения питания приводят к значительным изменениям тока. Более того, даже при совершенно стабильном напряжении питания ток диода будет изменяться при колебаниях температуры окружающей среды и разогрева диода. Величины допустимых нестабильностей и пульсаций тока питания определяются требованиями к стабильностям частоты и мощности генератора и указываются в техническом паспорте прибора.

Выходная мощность и частота генерируемых колебаний генераторов зависит от КСВН нагрузки. При плохом согласовании генератора с высокочастотной нагрузкой часть выходной мощности отражается от нагрузки и поступает в генератор, что может вызвать возбуждение паразитных колебаний. При изменении параметров высокочастотной нагрузки изменяется и частота генерируемых колебаний. Это явление называется затягиванием частоты. Чтобы избежать нестабильной работы генератора на высокочастотную нагрузку с большим значением КСВН (больше 1,5), включают между генератором и нагрузкой ферритовый вентиль или развязывающий аттенюатор. Изменение температуры окружающей среды приводит к изменению частоты и мощности колебаний генераторов при неизменном токе питания. Нестабильность выходной мощности не более 0,03дБ */*∘C. Напряжение перестройки 0*…*20 В. Интервал рабочих температур от -5 до +500∘C.

В настоящее время накоплен немалый опыт их применения в приёмо-передающих модулях активных фазированных антенных решеток (АФАР), радиомаяках, генераторах накачки параметрических усилителей, связных и телеметрических передатчиках, РЛС малой мощности.

**Заключение**

Генераторы на ЛПД применяются в радиорелейных линиях связи, в системах доплеровской посадки самолётов и высотомерах, портативных и переносных РЛС, фазированных антенных решётках РЛС, системах сигнализации и другой аппаратуре. Они используются в качестве генераторов в передающих устройствах и гетеродинах приёмников, радиотехнической разведке и радио-противодействия и источников колебаний в измерительной аппаратуре.

**Список использованных источников**

1. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Физмалит, 2008. 488 с.
2. Грехов И.В., Сережкин Ю.Н. Лавинный пробой p-n-перехода в полупроводниках. Л.: Энергия, 1980. 152 с.
3. Воротков М.В., Скворцов Н.Н., Шашкина А.С. Фрактальные свойства микроплазменного шума // Материалы III Всероссийской научно-практической конференции Инновационные технологии в медиаобразовании. CПб., 2015. С. 65–71.
4. Шуберт Ф.Е. Светодиоды / Под ред. А.Э. Юновича. М.: Физмалит, 2008. 496 с.
5. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 254 с.
6. Скворцов Н.Н., Шашкина А.С. Квантово-механический осциллятор в Maple // Сборник материалов Тринадцатой международной конференции «Физика в системе современного образования». Санкт-Петербург, 2015. 393 с.
7. Короленко П.В., Маганова М.С., Меснянкин А.В. Новационные методы анализа стохастических процессов и структур в оптике. Фрактальные и мультифрактальные методы, вейвлет-преобразования. М.: МГУ, 2004. 82 с.
8. Хандурин А.В. Сигналы с аддитивной фрактальной структурой. Дисс. … канд. техн. наук. М.: МЭИ, 2011,  
   216 с.
9. Потапов А.А. Фрактальный радиолокатор // Вестник РГРТУ. 2015. № 52. С. 28–42.
10. Выболдин Ю.К., Кривошейкин А.В., Нурмухамедов Л.Х. Методы обработки сигналов в системах передачи дискретной информации. СПб.: СПбГИКиТ, 2015. 320 с.