

## ЧАСТОТНЫЕ И АМПЛИТУДНЫЕ ФЛУКТУАЦИИ ГЛПД 8-ММ ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

*А.В. Архипов, В.Т. Плаксий, И.К. Кузьмичев, Э.Д. Прохоров,  
А.В. Дядченко\*, Д.П. Чуешков\**

*Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины,  
ул. ак. Проскуры 12, Харьков, 61085, Украина*

*\*Харьковский Национальный университет им. В.Н. Каразина  
пл. Свободы 4, Харьков, 61077, Украина*

*Приведены расчетные и экспериментальные результаты исследования частотных и амплитудных флуктуаций генератора на лавинно-пролетном диоде (ЛПД) 8-ми миллиметрового диапазона длин волн. Проведена численная оценка модуляционных шумов, обусловленных флуктуациями параметров ЛПД, зависимости спектральных плотностей амплитудных и частотных шумов от частоты анализа.*

### ВВЕДЕНИЕ

Как показано в [1-5] генераторы на лавинно-пролетных диодах (ГЛПД) уступают электровакуумным приборам и генераторам на диодах Ганна по долговременной стабильности частоты, поэтому вопросы повышения стабильности частоты и снижения уровня частотных шумов в ГЛПД являются актуальными.

Для стабилизации частоты твердотельных СВЧ генераторов применяются известные методы, использующие внешнюю синхронизацию, параметрическую стабилизацию частоты с помощью высокодобротных резонаторов, автоматическую подстройку частоты. Выбор того или иного способа стабилизации частоты ГЛПД зависит от требований, предъявляемых к параметрам генератора, как уровень флуктуаций, коэффициент полезного действия, полоса перестройки, габариты, вес и т.д. В миллиметровом (мм) диапазоне длин волн для увеличения стабильности частоты и снижения уровня частотных шумов, практическое применение получил метод, основанный на “затягивании” частоты ГЛПД дополнительными высокодобротными резонаторами.

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Как известно, для оценки спектра флуктуаций колебания ГЛПД необходимо определить спектральную плотность шумового напряжения. Как следует из общей теории низкочастотных шумов, сведения о полном уровне этих шумов и их распределении по частоте желательно подтвердить экспериментально. С этой целью воспользуемся экспериментальной методикой и аппаратурой описанной в работе [4].

Измерения спектральной плотности шумового напряжения выполнялись для кремниевых ЛПД (более 20 приборов) с пробивными напряжениями  $U_{проб} = (23...25)$  В. Для уменьшения влияния цепи питания на шумовые характеристики ЛПД смещение подавалось от стабилизированного источника тока, причем последовательно с ЛПД включалось сопротивление, значительно превышающее дифференциальное сопротивление ЛПД.

### 2 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 1 приведена зависимость спектральной плотности шумового напряжения  $B_u(F)$  от тока питания  $I_0$  для диодов, работающих в режиме холостого хода. Из рисунка следует, что при малых токах

питания наблюдается значительный рост шумового напряжения. Это можно объяснить существованием в ЛПД избыточного фликкер-шума. При увеличении тока питания спектральная плотность шумового напряжения приближается к минимальной теоретической величине.

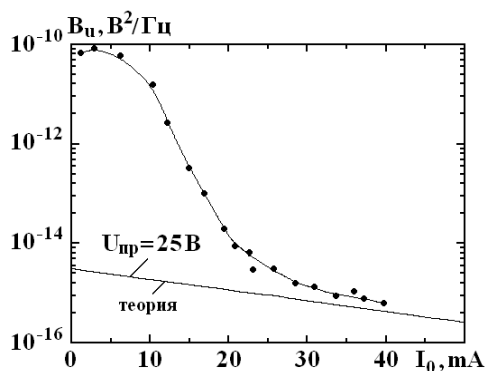


Рисунок 1 - Зависимость спектральной плотности шумового напряжения от тока питания

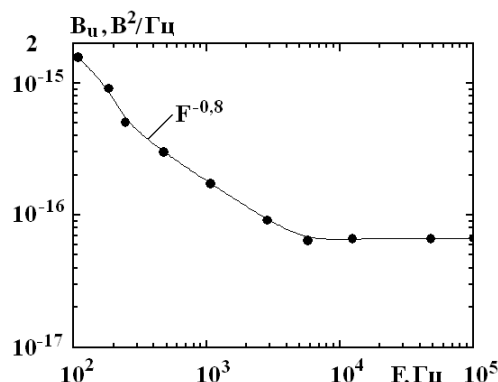


Рисунок 2 - Зависимость спектральной плотности шумового напряжения от частоты

Для ЛПД, в режиме генерации, на рис. 2 приведена зависимость спектральной плотности шумового напряжения от частоты анализа ( $F$ ) при токе питания  $I_0 = 70 \text{ мА}$ . Из рисунка видно, что для частот  $F < 5 \cdot 10^3 \text{ Гц}$  спектральная плотность шумового напряжения изменяется по закону  $F^{-0,8}$ . На частотах анализа  $F > 5 \cdot 10^3 \text{ Гц}$  спектральная плотность шумового напряжения имеет равномерный спектр.

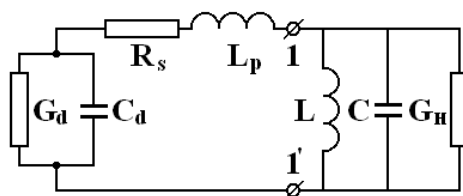


Рисунок 3 - Упрощенная эквивалентная схема ГЛПД

Выполним численную оценку низкочастотных (модуляционные) шумов, обусловленных флуктуациями параметров ЛПД. Для этого воспользуемся упрощенной эквивалентной схемой ГЛПД (рис. 3). В эквивалентной схеме емкость корпуса диода включена в емкость эквивалентного контура генератора  $C$ . Как видно из эквивалентной схемы, проводимость ЛПД с учетом реактивных параметров характеризуется комплексной величиной, являющейся функцией частоты

$$Y_d(j\omega) = G_d(\omega) + jB_d(\omega). \quad (1)$$

Выражая  $Y_d(j\omega)$  через параметры эквивалентной схемы, уравнения (1) запишем в виде :

$$Y_d(j\omega) = \frac{-G_d(1 - R_s G_d - R_s C^2 \omega^2 / C_d) + j\omega C \left(1 - C_d^2 \frac{L_p}{C} - L_p C \omega^2\right)}{\left(\frac{C\omega}{G_d}\right)^2 \left(-R_s G_d + \frac{L_p C_d^2}{C}\right)^2 + (1 + R_s G_d - L_p C \omega^2)}, \quad (2)$$

где :  $G_d$  - проводимость диода ;  $R_s$  - сопротивление потерь ;  $C_d$  - емкость диода ;  $L_p$  - индуктивность диода.

Для анализа флуктуационных свойств ЛПД при наличии нелинейных элементов  $C_d$  и  $C$  колебаний большой амплитуды необходимо заменить параметры этих элементов их средними значениями по первой гармонике  $C_{d1}$  и  $C_1$ . Это позволит заменить нелинейную проводимость ЛПД в точках 1 - 1' эквивалентной схемы ( рис. 3 ) линеаризованной проводимостью ( средней по первой гармонике)

$$Y_{d1}(j\omega) = G_{d1}(\omega) + jB_{d1}(\omega) = |Y_{d1}(j\omega)| e^{j Y_{d1}}, \quad (3)$$

где:

$$G_{d1}(\omega) = \frac{G_1(1 - R_s G_1 - R_s C_1^2 \omega^2 / G_1)}{\left(\frac{C_1 \omega}{G_1}\right)^2 \left(-R_s G_1 + \frac{L_p G_1^2}{C_1}\right)^2 + (1 - R_s G_1 - L_p C_1 \omega^2)^2}, \quad (4)$$

$$B_{d1}(\omega) = \frac{\omega C_1 \left(1 - G_1^2 \frac{L_p}{C_1} - L_p C_1 \omega^2\right)}{\left(\frac{C_1 \omega}{G_1}\right)^2 \left(-R_s G_1 + \frac{L_p G_1^2}{C_1}\right)^2 + (1 - R_s G_1 - L_p C_1 \omega^2)^2}. \quad (5)$$

Из выражений (4, 5) величины  $G_{d1}(\omega)$  и  $B_{d1}(\omega)$  зависят от амплитуды первой гармоники на контуре  $U_1$  в точках 1 - 1' эквивалентной схемы, поскольку  $G_d$  и  $C$  зависят от  $U_1$ . Для ГЛПД в стационарном режиме уравнение баланса фаз записывается в виде :

$$\varphi_{d1} + \varphi_{\kappa} = 0, \quad (6)$$

где :  $\varphi_{d1}$ ,  $\varphi_{\kappa}$  - сдвиг фаз между первой гармоникой СВЧ тока  $I_1$  и напряжением на диоде и контуре. Фазовый угол средней проводимости определяется как

$$\varphi_{d1} = -\arctg \frac{\omega C_1 - \omega L_p G_1^2 - \omega^3 L_p C_1^2}{G_1 - R_s G_1^2 - R_s C_1^2 \omega^2}. \quad (7)$$

Флуктуации фазового угла находим как

$$\Delta \varphi_{d1} \approx A_1 \delta G_1 + B_1 \delta C_1, \quad (8)$$

где:

$$A_1 = G_1 \frac{\omega L_p (C_1^2 - \omega^2 C_1) + \omega C_1 (1 - 2R_s G_1)}{(G_1 - R_s G_1^2 - R_s C_1^2 \omega^2)^2 + (\omega C_1 - \omega L_p G_1^2 - \omega^3 L_p C_1^2)^2},$$

$$B_1 = C_1 \frac{\omega (G_1 - R_s G_1^2) - \omega^3 C_1^2 L_p^3 \left( 2G_1 - \frac{C_1 R_s}{L_p} \right)}{(G_1 - R_s G_1^2 - R_s C_1^2 \omega^2)^2 + (\omega C_1 - \omega L_p G_1^2 - \omega^3 L_p C_1^2)^2}.$$

Используя результаты эксперимента, оценим вклад источников шума в спектральные плотности амплитудных и частотных шумов. Для этого зададимся следующими параметрами ГЛПД:  $f_0 = 4 \cdot 10^{10}$  Гц;  $P_0 = 0,1$  Вт;  $Q_n = 100$ ;  $R_d = -3$  Ом;  $R_s = 0,5$  Ом;  $L_p = 0,1 \cdot 10^{-9}$  Гн;  $C_1 = 0,2 \cdot 10^{-12}$  Ф;  $U_0 = 30$ В;  $I_0 = 1$  А. На рис. 4 и 5 приведены зависимости спектральных плотностей амплитудных  $B_a$  и частотных  $G_v$  шумов от частоты анализа  $F$ . Из этих рисунков видно, что основной вклад в спектр флуктуаций амплитуды и частоты на частотах анализа  $F \leq 5 \cdot 10^3$  Гц вносит избыточный фликкер-шум. На частотах анализа  $F > 5 \cdot 10^3$  Гц уровень спектральных плотностей амплитуды и частотных шумов определяется модуляционными и дробовыми шумами.

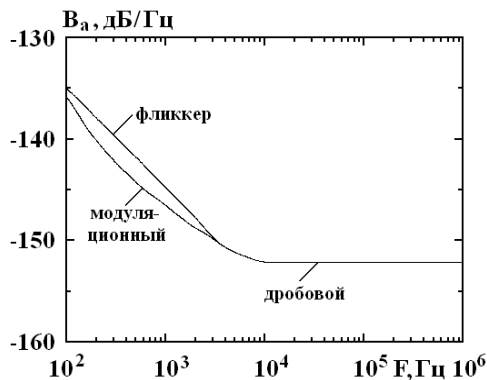


Рисунок 4 – Зависимость амплитудных шумов от частоты

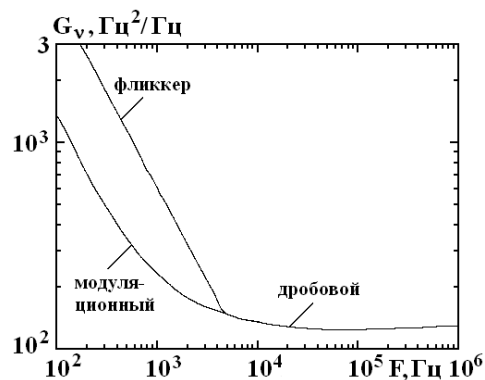


Рисунок 5 – Зависимость частотных шумов от частоты

### ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований показывают, что выпускаемые отечественной промышленностью ЛПД имеют достаточно высокий уровень избыточных фликкерных шумов. Улучшение качества ( $p-n$  перехода), увеличение добротности внешнего контура и выбор оптимальных режимов работы позволит снизить уровень шумов в доплеровском диапазоне частот.

## SUMMARY

### FREQUENCY AND PEAK FLUCTUATIONS OF IMPATT-DIODE IN 8-MM WAVELENGTH RANGE

**A.V. Arkhipov, V.T. Plaksiy, I.K. Kuzmichev, E.D. Prokhorov, A.V. Dydchenko\*, D.P. Chuechkov\***

*Institute for Radiophysics and Electronic NASU 12, acad. Proskura street, Kharkov, Ukraine, 61085*

*\* Karazin Kharkov National University, 4, Svobody sq., Kharkov, Ukraine, 61077*

*The calculation and experimental results of research of frequency and peak fluctuations of the impact avalanche transit-time (IMPATT) diode for the 8 millimeter wavelength range have been presented. The numeral estimation of modulation noises, parameters of IMPATT diode, dependence of spectral closenesses of peak and frequency noises on frequency of analysis, conditioned fluctuations is conducted.*

**KEY WORDS:** millimeter wave range, IMPATT diode, spectral density of noise tension, fluctuations, flicker noise

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарер А.С., Вальд-Перлов В.М. Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ. – М.: Сов. Радио, 1968. – 480 с.
2. Гутман, Кухаревский. Низкочастотный шум серийных Impatt диодов из Si и GaAs // ТИИЭР. – 1973. - Т. 61, № 5. - С. 197 – 199.
3. Бугаев А.В. Частотная зависимость модуляционных шумов ГЛПД // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. - 1977. - № 2. - С. 103 – 105.
4. Архипов А.В., Булгаков Б.М. Исследование энергетических и спектральных характеристик ГЛПД мм диапазона волн // В кн.: Труды ИРЭ АН УССР. – 1978. - Т. 24. - С. 135 – 148.
5. Касаткин Л.В., Чайка В.Е. Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн. – Севастополь, Вебер, 2006. – 319 С.

**Архипов А. В.**, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник отдела твердотельной электроники;

**Кузьмичев И.К.**, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник отдела теории дифракции и дифракционной электроники;

**Плакси В. Т.**, кандидат физ.-мат. наук, доцент, старший научный сотрудник отдела радиофизики твердого тела;

**Прохоров Э.Д.**, доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры физической и биомедицинской электроники и комплексных информационных технологий;

**Дядченко А.В.**, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник кафедры физической и биомедицинской электроники и комплексных информационных технологий;

**Чуешков Д. П.**, инженер кафедры физической и биомедицинской электроники и комплексных информационных технологий

*Поступила в редакцию 4 апреля 2008 г.*