

УДК 621.382.2

## ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЙ НА ШУМЫ ГЕНЕРАТОРОВ НА ЛАВИННО-ПРОЛЕТНЫХ ДИОДАХ ИЗ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ С ОДНОРОДНЫМ ПРОФИЛЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ

С. А. Корнилов, В. М. Павлов

Приведены результаты экспериментального исследования зависимости спектральных плотностей флуктуаций амплитуды и частоты колебаний генераторов на лавинно-пролетных диодах от связи с нагрузкой. Показано, что на частотах порядка сотен герц—единиц мегагерц, где проявляются шумы лавинообразования, характер зависимостей определяется отношением рабочего тока к номинальному. При их близости зависимости становятся очень резкими.

Как показывает эксперимент, амплитудные и частотные шумы генераторов на лавинно-пролетных диодах (ЛПД) существенно зависят от амплитуды колебаний, возрастая с ее увеличением. Этот эффект наблюдался на Ge-, Si- и GaAs-диодах [1–5]. Теория связывает его с фундаментальной причиной — периодической нестационарностью шума лавинообразования [2, 3, 6–9], однако она учитывается в указанных работах по-разному, что приводит к различию результатов (например, [2, 3] и [8]). Сложность задачи затрудняет априорную оценку используемых приближений, что придает особое значение сопоставлению с экспериментом.

К сожалению, опубликованные экспериментальные данные трудно использовать для такого сопоставления. Прежде всего, это связано с тем, что в экспериментальных работах зачастую не приводятся все сведения, необходимые для расчетов (за исключением [2]), однако в этой работе сопоставление проводится в области небольших амплитуд колебаний, при которых периодическая нестационарность проявляется слабо). Кроме того, не всегда можно быть уверенным в том, что сообщаемые данные типичны. Помимо периодической нестационарности, характер зависимости шумов от амплитуды колебаний может определяться и другими факторами, например возбуждением паразитных колебаний [10]. Отделить эти эффекты, а также оценить влияние технологического разброса параметров ЛПД можно только при достаточной статистике эксперимента.

Целью настоящей работы было получение экспериментальных данных, которые могли бы в определенной мере восполнить указанные пробелы. Исследование проведено в диапазоне 10 ГГц на ЛПД из GaAs с барьером Шоттки и однородным профилем легирования. С точки зрения сравнения с теорией ЛПД этого типа привлекательны тем, что они лучше всего удовлетворяют часто используемым теоретическим предположениям: узкий слой умножения, равенство коэффициентов ударной ионизации и дрейфовых скоростей электронов и дырок.

**1. Методика эксперимента.** В эксперименте использовалась перестраиваемая волноводная генераторная секция с регулируемой в широких пределах связью с нагрузкой. Развязка между генератором и

измерительным трактом обеспечивалась цепочкой, состоящей из диссипативного аттенюатора с затуханием около 10 дБ, циркулятора и ферритового вентиля.

Амплитудный шум измерялся корреляционным (двухканальным) методом в спектральном диапазоне 30 Гц—205 кГц. В режимах с повышенным уровнем шума, когда можно было перейти к одноканальным измерениям, диапазон частот анализа расширялся до 6 МГц. Для обеспечения необходимой чувствительности измерений использовались СВЧ детекторы на диодах с барьером Шоттки.

Частотный шум измерялся одноканальным методом, причем дискриминатором служил расстроенный резонатор, добротность которого подбиралась так, чтобы измеряемые шумы превышали собственные шумы измерительного устройства и амплитудные шумы генератора — не менее чем на 15—20 дБ во всех режимах работы последнего. Спектральный диапазон измерения частотного шума — 30 Гц—6 МГц.

Анализ спектра флуктуаций проводился с разрешением 6 Гц на частотах ниже 20 кГц, 200 Гц в диапазоне 20—205 кГц и 10 кГц на частотах выше 205 кГц. Все приводимые результаты отнесены к полюсе анализа 1 Гц, т. е. представляют собой приближенные спектральные плотности флуктуаций.

Для оценки систематической погрешности измерений использовались независимые способы калибровки аппаратуры. В случае амплитудного шума измеритель калибровался по СВЧ модулятору на полупроводниковом диоде и — независимо — с помощью низкочастотного сигнала-генератора с привлечением экспериментальных данных о параметрах СВЧ детектора [11]. Расхождение результатов не превышало 1—2 дБ. В случае частотного шума калибровка выполнялась с помощью низкочастотного сигнала-генератора с использованием результатов статических измерений крутизны частотного детектора и — независимо — с помощью частотной модуляции отражательного клистрона, замещавшего исследуемый ГЛПД. В диапазоне частот анализа 30 Гц—205 кГц расхождение результатов составляло 1—2 дБ. На более высоких частотах анализа точность первого метода уменьшалась, и поэтому измеритель калибровался по методу модуляции отражательного клистрона.

Случайная погрешность измерений, связанная с естественной (флуктуационной) ошибкой показаний индикатора мощности шума, становилась ощутимой только при измерении малых уровней амплитудного шума, выполнявшемся двухканальным методом. Пороговая чувствительность измерителя, соответствующая величине естественной ошибки 3 дБ, составляла около —140 дБ на частоте анализа 30 Гц и —170 дБ — на частоте 200 кГц. Для уменьшения ошибок, связанных с установлением температурного режима, измерения проводились после предварительного прогрева генератора в течение 1—1,5 часов.

Физические параметры и конструкция исследовавшихся ЛПД описаны в [12]. Приведем значения тех параметров, которые необходимы для расчета теоретических зависимостей: угол пролета электронов в слое умножения  $\theta_a = 0,36\pi$ , угол пролета в слое дрейфа  $\theta_d = 0,8\pi$ , емкость слоя умножения  $C_a = 2$  пФ, емкость слоя дрейфа  $C_d = 0,9$  пФ, концентрация доноров в обедненном слое  $N_d = 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, площадь перехода  $S = 1,8 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>, дрейфовая скорость носителей  $v_0 = 5,5 \cdot 10^6$  см/с, напряженность электрического поля пробоя  $E_{пр} = 3,6 \cdot 10^5$  В/см, величина производной коэффициента ионизации по полю  $\alpha'(E_{пр}) \cong 0,2$  В<sup>-1</sup>. Величина тока питания ЛПД  $I_0$  указана в пояснениях к графикам.

Амплитуда колебаний управлялась связью ГЛПД с нагрузкой. При этом изменялась добротность нагруженного резонатора  $Q_n$ ; ее величина определялась из уравнения самовозбуждения ГЛПД при разных значениях пускового тока  $I_n$ . Для контроля полученных цифр были проведе-

ны измерения внешней добротности  $Q_{вн}$  (в режиме регенеративного усиления) и рассчитана собственная добротность резонатора  $Q_0 = Q_{вн} Q_n (Q_{вн} - Q_n)^{-1}$  (табл. 1). Слабая зависимость  $Q_0$  от  $I_n$  свидетельствует о корректности расчета  $Q_n$ .

Таблица 1

$I_n, \text{ мА}$	69	67	57	47	36	30	25	22	20
$Q_n$ (расчет)	8,5	8,9	10,7	13,4	17,9	22,5	27,0	30,6	34,0
$Q_{вн}$ (измерения)	—	—	—	21	29	40	65	—	—
$Q_0$	—	—	—	37	47	51	46	—	—

Все измерения проводились при одинаковой величине балластного сопротивления  $R_G = 1,35 \text{ кОм}$ .

**2. Результаты эксперимента.** Были обследованы три партии однотипных ЛПД, изготовленных по одинаковой технологии в разное время. В дальнейшем порядковые номера диодов будут приводиться с указанием принадлежности к партии, например 1А, 2А, 1Б, 4В и т. д. Из-за неконтролируемых технологических отклонений тепловое сопротивление диодов разных партий несколько различалось, что обусловило различие в величине номинального тока  $I_{ном}$ . Для диодов партий А и Б  $I_{ном} = 110 \div 120 \text{ мА}$ , в то время как для диодов партии В  $I_{ном} = 80 \text{ мА}$ .

Таблица 2

Порядковый номер диода	Обозначение на рис. 1 а	$C_{пр}, n\Phi$	$\beta_{opt}$	$P_{max}, \text{ отн. ед}$
1А	темные кружки	0,79	1,8	—
2А	светлые кружки	0,69	2,0	630
3А	темные треугольники	0,71	2,0	620
4А	светлые треугольники	0,70	2,4	650
5А	крестики	0,68	2,0	610

На рис. 1 представлены результаты измерения спектральных плотностей относительных флуктуаций амплитуды  $S_\alpha$  и флуктуаций частоты  $S_f$  в зависимости от степени связи генератора с нагрузкой, характеризующей отношением рабочего тока к пусковому:  $\beta = I_0/I_n$ . Все данные приведены для  $I_0 = 80 \text{ мА}$ .

Количественное соответствие между  $\beta$  и амплитудой колебаний можно установить с помощью уравнения стационарных колебаний ГЛПД (например, [13]). Отметим, что увеличению  $\beta$  соответствует рост амплитуды колебаний.

Таблица 3

Порядковый номер диода	Обозначение на рис. 1б	$C_{пр}, n\Phi$	$\beta_{opt}$	$P_{max}, \text{ отн. ед}$
1Б	темные кружки	0,85	1,85	600
2Б	светлые кружки	0,85	2,0	620
3Б	крестики в кружке	0,85	2,4	520
4Б	темные треугольники	0,85	1,9	670
5Б	светлые треугольники	0,93	1,6	390
6Б	крестики	0,89	1,75	600
7Б	квадраты	0,95	—	—

В табл. 2—4 дана дополнительная информация — значения  $\beta = \beta_{opt}$ , соответствующие максимальной выходной мощности, ее уровень (в относительных единицах) при  $I_0 = 80 \text{ мА}$  и емкости диодов, измеренные в предпороговом режиме.

Рис. 1а, б, в дают представление о разбросе шумовых характеристик в каждой партии ЛПД, однако в некоторых случаях обилие экспериментальных «точек» затрудняет восприятие характера зависимостей. Это относится к ходу  $S_\alpha(\beta)$  в области небольших  $\beta$ , где наблюдались нерегулярности, а также к участку крутого подъема  $S_\alpha$  на рис. 1в (партия В). Для облегчения прочтения этих зависимостей «точки», относящиеся к нескольким характерным диодам каждой партии, соединены кривыми.

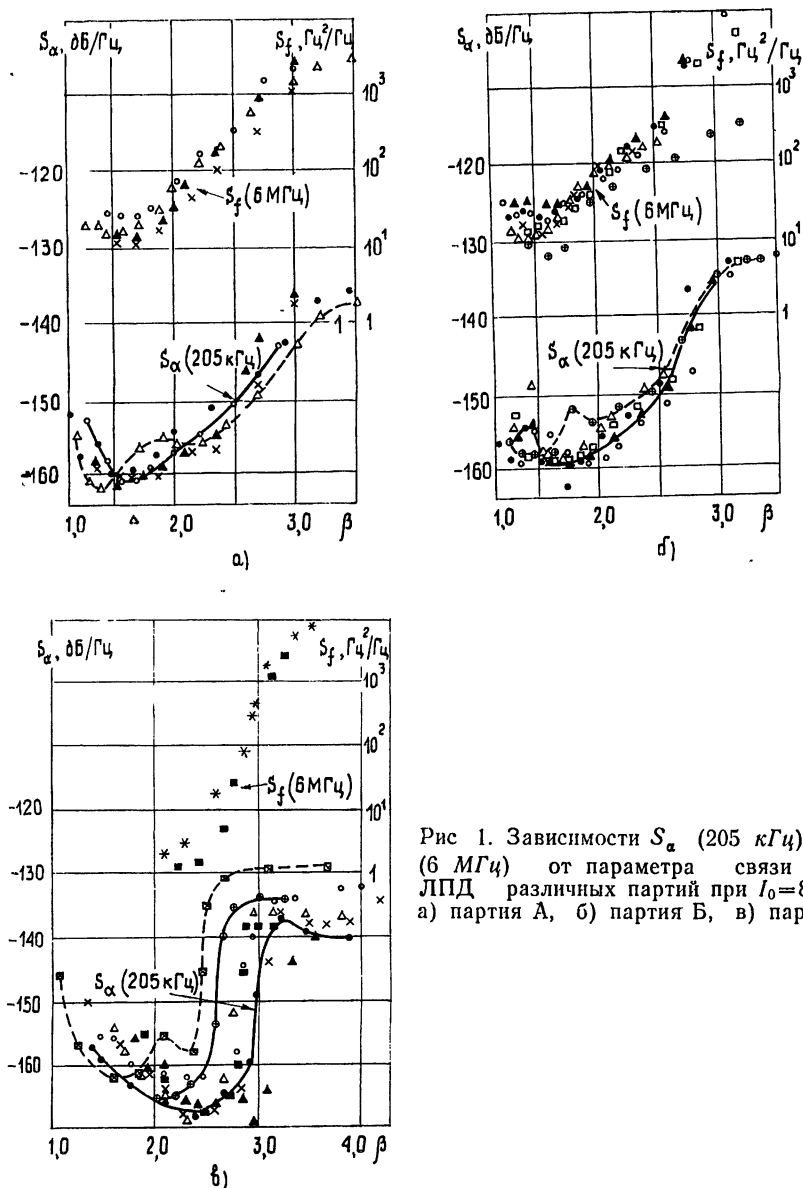


Рис 1. Зависимости  $S_\alpha$  (205 кГц) и  $S_f$  (6 МГц) от параметра связи  $\beta$  для ЛПД различных партий при  $I_0=80$  мА: а) партия А, б) партия Б, в) партия В.

Флуктуации колебаний ГЛПД формируются не только шумом лавинообразования, но и сугубо низкочастотными шумами (генерационно-рекомбинационными, фликкерными). Для выяснения влияния последних на результаты, представленные на рис. 1, были проведены спектральные измерения при нескольких значениях  $\beta$  (рис. 2). Видно, что с увеличением  $\beta$  спектры  $S_\alpha(F)$  и  $S_f(F)$  становятся равномернее,

что связано с усилением влияния лавинного шума. На частотно-зависимые составляющие спектров  $\beta$  влияет слабо, что следует как из рис. 2, так и из рис. 3, на котором показаны типичные зависимости  $S_\alpha(\beta)$  и  $S_f(\beta)$ , снятые на частоте  $F=30$  Гц.

Таблица 4

Порядковый номер диода	Обозначение на рис. 1в	$C_{пр}, n\Phi$	$\beta_{opt}$	$P_{max}$ , отн. ед.
1В	темные кружки	0,75	2,7	520
2В	светлые кружки	0,78	2,8	460
3В	крестик в кружке	0,81	2,5	480
4В	темные треугольники	0,88	2,9	500
5В	светлые треугольники	0,78	2,7	700
6В	крестики	0,76	2,8	540
7В	квадраты	0,78	2,6	620
8В	звездочки	0,78	2,1	600

Данные рис. 2 и 3 показывают, что зависимость  $S_f(\beta)$  на частоте анализа  $F=6$  МГц практически полностью определяется шумами лавинообразования. Зависимость  $S_\alpha(\beta)$ , снимавшаяся на более низкой частоте  $F=205$  кГц, не свободна от влияния источников низкочастотного шума в окрестности  $S_{\alpha min}$ . Однако их влияние ослабевает с увеличением  $S_\alpha$  и становится незначительным, если  $S_\alpha$  превышает  $S_{\alpha min}$  на порядок и более.

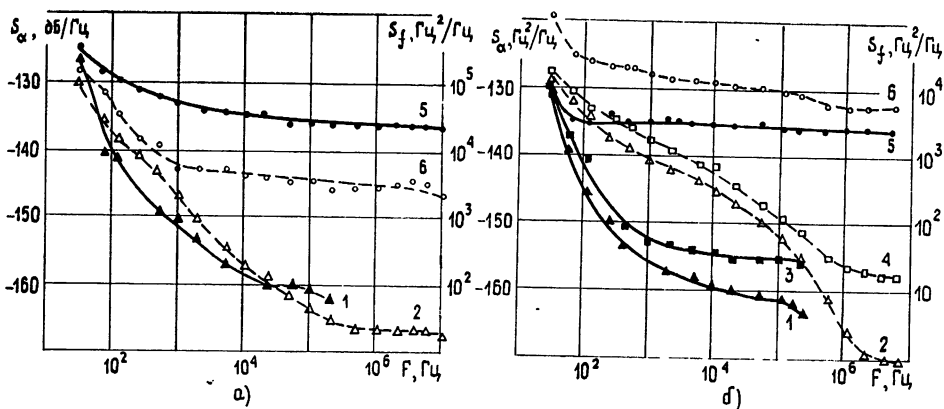


Рис. 2. Спектры  $S_\alpha(F)$  (сплошные линии) и  $S_f(F)$  (штрихи) в разных колебательных режимах ГЛПД;

кривые 1, 2 —  $\beta \cong \beta_{min}$  (окрестность  $S_{\alpha min}$ ), кривые 3, 4 —  $\beta = \beta_{opt}$  (точка максимальной выходной мощности), кривые 5, 6 —  $\beta > 3$  (область насыщения зависимости  $S_\alpha(\beta)$ ); а) диод серии А, б) диод серии В.

Приняв во внимание сказанное, вернемся к рис. 1. Сопоставление результатов, полученных на ЛПД партий А и Б (рис. 1а, б), показывает их сходство. В обоих случаях  $S_\alpha$  и  $S_f$  изменяются при  $\beta > 2$  довольно плавно, существует тенденция к насыщению зависимостей  $S_\alpha(\beta)$  и  $S_f(\beta)$  при  $\beta \geq 3$ , особенно заметная в ходе  $S_\alpha$ . Общим является также то, что для некоторых ЛПД ход  $S_\alpha(\beta)$  на начальном участке зависимости ( $\beta < 2$ ) нерегулярен («всплески», которые видны на кривых, проведенных пунктиром, — диоды 3А и 5Б). Близки и абсолютные уровни флуктуаций при одинаковых значениях  $\beta$ .

Результаты, полученные на ЛПД партии В (рис. 1в), существенно отличаются. Обращают на себя внимание чрезвычайно резкий рост уровней флуктуаций, ярко выраженное насыщение зависимости  $S_\alpha(\beta)$ ,

более плавный ход  $S_\alpha(\beta)$  в области минимальных значений  $S_\alpha$  и меньший, чем для ЛПД партий А и Б, уровень  $S_{\alpha \min}$ . Отметим также, что как  $S_\alpha(\beta)$ , так и  $S_f(\beta)$  очень близки по виду для разных экземпляров ЛПД и отличаются положением области крутого роста на оси абсцисс.

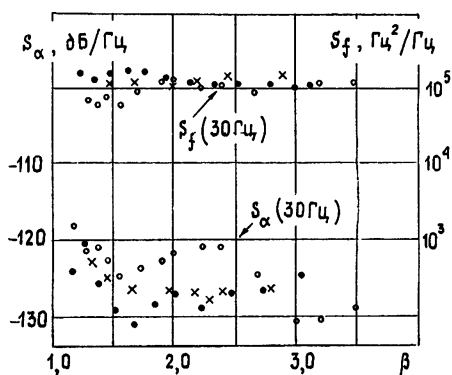


Рис. 3. Зависимости  $S_\alpha$  (30 Гц) и  $S_f$  (30 Гц) при  $I_0 = 80$  мА от параметра связи  $\beta$  для ЛПД 5А (светлые кружки), 1Б (темные кружки) и 8В (крестики).

В табл. 5 приведены некоторые усредненные характеристики, рассчитанные по данным табл. 2—4 и рис. 1.

Перепад уровней  $S_\alpha$  и  $S_f$  при изменении  $\beta$  на 5% рассчитывался на участке быстрого увеличения  $S_\alpha(\beta)$  и  $S_f(\beta)$ , соответствующем  $\beta = 2,5 \div 3$ .

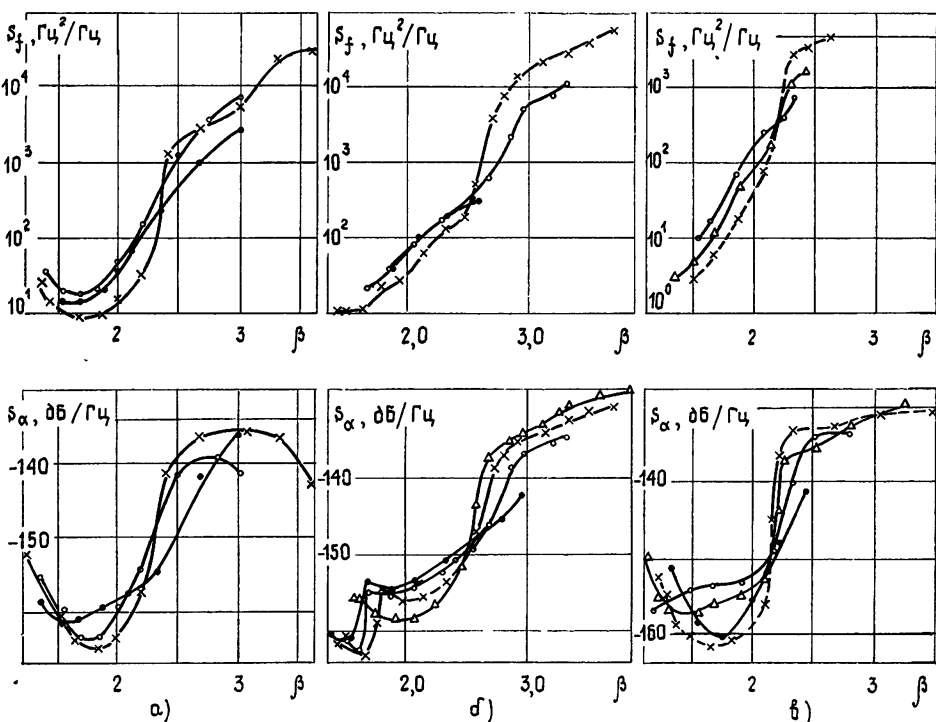


Рис. 4. Зависимости  $S_\alpha$  (205 кГц) и  $S_f$  (6 МГц) от параметра связи  $\beta$  при различной величине рабочего тока  $I_0$  для типичных ЛПД разных партий:

а) партия А (темные кружки) —  $I_0 = 80$  мА, светлые кружки —  $I_0 = 80$  мА, крестики —  $I_0 = 110$  мА; б) партия Б (темные кружки) —  $I_0 = 65$  мА, светлые кружки —  $I_0 = 80$  мА, крестики —  $I_0 = 100$  мА, треугольники —  $I_0 = 115$  мА; в) партия В — темные кружки —  $I_0 = 40$  мА, светлые кружки —  $I_0 = 50$  мА, треугольники —  $I_0 = 65$  мА, крестики —  $I_0 = 80$  мА.

Отметим, что в опубликованных работах можно найти примеры как плавного [1], так и резкого [4, 5] роста  $S_{\alpha}(\beta)$  и  $S_f(\beta)$ . Резкий рост был обнаружен, в частности, в генераторах на кремниевых ЛПД, так что эта особенность не связана с материалом диодов.

Т а б л и ц а 5

Партия ЛПД	$\bar{P}_{\max}$ , отн. ед.	$\bar{\beta}_{\text{opt}}$	Перепад уровней при изменении $\beta$ на 5%, дБ	
			$S_{\alpha}$	$S_f$
А	630	2,0	4	3
Б	570	1,9	5	2
В	630	2,55	20	14

Рис. 4 показывает влияние рабочего тока  $I_0$  на вид зависимостей  $S_{\alpha}(\beta)$  и  $S_f(\beta)$  на примере типичных для каждой партии ЛПД. Для всех партий просматривается общая тенденция: крутизна зависимостей на участке роста тем больше, чем больше  $I_0$ . Это проявляется особенно ярко в амплитудном шуме. Однако если сравнить рис. 4а, б (ЛПД партий А, Б) с рис. 4в (ЛПД партии В), то станет ясно, что характер зависимостей определяется не просто величиной  $I_0$ , а скорее отношением  $I_0/I_{\text{ном}}$ , где  $I_{\text{ном}}$  — номинальный ток ЛПД. Напомним, что для ЛПД партий А и Б  $I_{\text{ном}} = 110 \div 120$  мА, а для партии В — 80 мА. При одинаковом  $I_0$  зависимости резко различаются (сравним рис. 4а, б с рис. 4в). Особенности зависимостей, проявляющиеся при приближении  $I_0$  к  $I_{\text{ном}}$ , могут быть связаны с тепловыми явлениями, поскольку  $I_{\text{ном}}$  определяется допустимой температурой перехода.

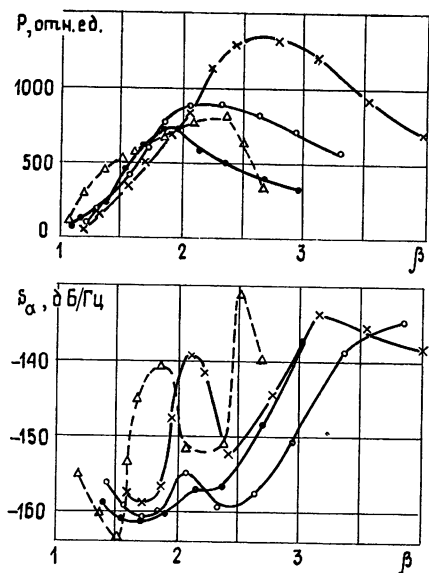


Рис. 5 Зависимости колебательной мощности  $P$  (вверху) и  $S_{\alpha}$  (205 кГц) (внизу) от параметра связи  $\beta$  для ЛПД 6А (сплошные линии) и 5Б (штрихи), показывающие возникновение значительных нерегулярностей при большой величине рабочего тока  $I_0$ ;  
6А, темные кружки —  $I_0 = 80$  мА, светлые кружки —  $I_0 = 100$  мА, крестики —  $I_0 = 120$  мА; 5Б,  $I_0 = 100$  мА.

Отметим, что корреляция шумовых характеристик с емкостью диодов  $C_{\text{пр}}$  отсутствует. Из табл. 2—4 следует, что по этому параметру ЛПД партии В занимают промежуточное положение: для них среднее значение  $C_{\text{пр}}$  равно 0,79 пФ, в то время как для ЛПД партий А и Б 0,71 пФ и 0,88 пФ соответственно.

Как видно из рис. 4 и рис. 1, ход  $S_{\alpha}(\beta)$  в окрестности  $S_{\alpha \text{ min}}$  часто нерегулярен. В ряде случаев, в основном для ЛПД партий А и Б,

наблюдались значительные аномалии (рис. 5). При увеличении  $I_0$  небольшая нерегулярность превращалась в интенсивный пик\*. Как правило, этому сопутствовала характерная деформация зависимости выходной мощности ГЛПД от  $\beta$  (рис. 5, верхний график). Измерения показали, что спектр флуктуаций в максимуме пика равномерен вплоть до частоты анализа  $F=6$  МГц. Перестройка генератора по частоте изменяла форму пика. При некоторых настройках он подавлялся (рис. 6).

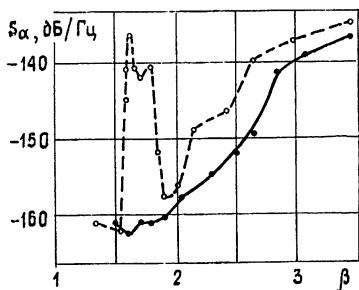


Рис 6. Зависимости  $S_\alpha$  (205 кГц) для ЛПД 8Б от параметра связи  $\beta$  при разной частоте генерации  $f_0=10,10$  ГГц (сплошная линия) и  $f_0=10,27$  ГГц (штрихи).

Возможной причиной аномалий является параметрическое возбуждение СВЧ колебаний, сопровождающееся переносом шума на частоту генерации [10]. В пользу этого говорит равномерность спектров флуктуаций в максимуме пика, изменение его формы и интенсивности при перестройке ГЛПД, а также искажение зависимости мощности колебаний от  $\beta$ . Прямого экспериментального подтверждения этой точки зрения пока что нет.

Почти ступенчатая форма зависимостей  $S_\alpha(\beta)$  и  $S_f(\beta)$  при  $I_0 \cong I_{\text{ном}}$  (участок чрезвычайно быстрого роста, переходящий в насыщение при больших значениях  $\beta$  — рис. 4а, б, в) наводит на мысль о том, что в этих условиях действие периодической нестационарности осложняется другими факторами, приводящими к явлениям типа пороговых. При уменьшении  $I_0/I_{\text{ном}}$  влияние этих факторов ослабевает. Их физическая природа пока что неясна, и они не отражаются разработанными на сегодняшний день теоретическими моделями.

Из сказанного следует, что экспериментальная проверка существующих вариантов теории периодически нестационарных флуктуаций в ГЛПД должна проводиться при  $I_0 < I_{\text{ном}}$ , когда зависимость их уровня от амплитуды колебаний становится достаточно плавной. Из рис. 4 видно, что это происходит при  $I_0 < (0,5 \div 0,7) I_{\text{ном}}$ . При соблюдении этого условия ослабевают и другие аномалии, отмеченные в конце разд. 2. Конечно, это не дает гарантии того, что экспериментальные данные полностью освобождаются от влияния нежелательных факторов, однако существенно уменьшает вероятность ошибочных выводов. Применительно к результатам настоящей работы сказанное означает, что могут быть использованы данные, приведенные на рис. 1а и 1б, — для частотного шума во всем диапазоне изменения  $S_f(\beta)$ , а для амплитудного — исключая участок, в котором  $S_\alpha(\beta)$  превышает  $S_{\alpha \text{ min}}$  менее чем на порядок (в этом участке, как указано в разд. 2, проявляется действие источников низкочастотного шума).

В заключение авторы выражают благодарность В. М. Вальд-Перлову и Л. С. Сибирцеву за содействие в постановке работы и полезное обсуждение, а также Г. Б. Гогоберидзе за обсуждение результатов в ходе работы.

\* Интенсивный пик обнаруживался при этом и в зависимости  $S_f(\beta)$ , не показанной на рис. 5.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Тагер А. С., Ходневич А. Д., Цебиев А. М.—Изв. вузов—Радиоэлектроника, 1969, 12, № 9, с. 962.
2. Goedbloed J. J., Vlaadingerbroek M. T.—IEEE Trans., 1974, ED-21, № 6, p. 342.
3. Stutz H. e. a.—IEEE Trans., 1976, ED-23, № 9, p. 1070.
4. Камоликова Е. В., Карташев В. И., Левитес А. А., Монн И. И., Сметанин А. И.—Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, 1977, № 1, с. 36.
5. Motohara Ohlomo—IEEE Trans., 1972, MTT-20, № 7, p. 425.
6. Fikart J., Goud P.—J. Appl. Phys., 1973, 44, № 5, p. 2284.
7. Якимов А. В.—Радиотехника и электроника, 1976, 21, № 9, с. 1874.
8. Зайцев В. В., Якимов А. В.—Радиотехника и электроника, 1977, 22, № 7, с. 2180.
9. Кулешов В. Н., Харитонов И. Н. Аннотации и тезисы докладов XXXIII научной сессии НТОРЭ и С им. А. С. Попова, посвященной Дню радио.— М., 1978.
10. Hines M. E.—Proc. IEEE, 1972, 60, № 5, p. 1534.
11. Корнилов С. А.—Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ, 1977, вып 8(471).
12. Вейц В. В., Вальд-Перлов В. М., Карташев Б. П., Фомин Ю. В. Микроэлектроника и полупроводниковые приборы.— Сб. статей /Под ред. Васенкова А. А. и Федотова Я. А.— М.: Сов. радио, 1976, вып. 1, с. 236.
13. Тагер А. С., Вальд-Перлов В. М. Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ.— М.: Сов. радио, 1968.

Ленинградский электротехнический  
институт связи

Поступила в редакцию  
4 мая 1982 г.

### THE INFLUENCE OF THE AMPLITUDE OF OSCILLATIONS ON NOISE OF IMPATT'S, USING UNIFORMLY DOPED GALLIUM ARSENIDE DIODES

*S. A. Kornilov, V. M. Pavlov*

The results of experiments, demonstrating the influence of loading conditions on amplitude and frequency noise of IMPATT'S are given. It is shown, that the dependence of noise levels on the oscillation amplitude becomes very sharp when operating current approaches to its nominal value.

---