

УДК 621.382.23.011.222.4

## К ИЗМЕРЕНИЮ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ШУМОВ ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ

Ю. А. Васильев, В. А. Щеглов

Предложен метод и приведены результаты экспериментального исследования фликкерных флуктуаций слаботочных арсенид-галлиевых туннельных диодов в области отрицательной проводимости вольт-амперной характеристики.

### ВВЕДЕНИЕ

Знание характеристик низкочастотных шумов туннельных диодов (ТД) необходимо как при исследовании физической стороны явления с целью выяснения природы его возникновения и, в конечном итоге, его минимизации, так и при практическом применении этих приборов. Например, для прогнозирования надежности радиоаппаратуры и при разработке устройств генерирования и преобразования частот. Однако эти шумы ТД по сравнению с шумами других полупроводниковых приборов исследованы недостаточно полно. Известные работы [1, 2], во-первых, посвящены шумам в опытных образцах и не содержат сведений о шумах серийных ТД, и, во-вторых, измерения проводились лишь на частотах звукового диапазона при напряжениях, превышающих минимальное ( $u_b$ ) статической характеристики.

В работе рассматривается простой метод измерения флуктуаций тока ТД в широкой полосе частот, представлены результаты экспериментальных исследований фликкерных шумов слаботочных GaAs серийных ТД и анализируется связь этих шумов с избыточными токами. Измерения проведены при напряжениях смещения в пределах  $0 \div u_b$ , являющихся рабочими для диодов, используемых в упомянутых выше устройствах.

### МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Для экспериментального исследования  $1/f$ -шума ТД обычно используют измерительные схемы с параллельным питанием диода, содержащие согласующий трансформатор [1] или шунтирующий ТД резистор [3, 4]. Наличие трансформатора усложняет исследования флуктуаций в широком диапазоне частот и, что особенно важно, не позволяет проводить их вблизи нулевых частот. Такие измерения возможны с помощью схем с шунтирующим резистором, однако при их практическом использовании возникают трудности с устранением ВЧ автоколебаний малой интенсивности, вызываемых паразитными емкостями и индуктивностями диодов.

Приведенная на рис. 1 а схема измерительной установки свободна от указанных недостатков и позволяет исследовать флуктуации тока ТД в диапазоне от нулевых частот до нескольких сотен килогерц. Основным элементом схемы является параллельный контур с постоянным полным сопротивлением, подключенный к ТД. (Сопротивление на

зажимах контура, как известно, не зависит от частоты и равно волновому сопротивлению  $\rho$  при  $\rho = R = R_d$ .) Для обеспечения устойчивости схемы по постоянному и переменному токам величины  $R$  и  $\rho$  выбираются из условий  $\frac{1+R}{R_d} > 0$  и  $\frac{1+\rho}{R_d} > 0$ , где  $R_d$  — динамическое сопротивление ТД. При обнаружении неустойчивости некоторых рабочих точек диода, соответствующих отрицательному участку вольт-амперной характеристики, это явление устраняется увеличением резистора  $R_d$ .

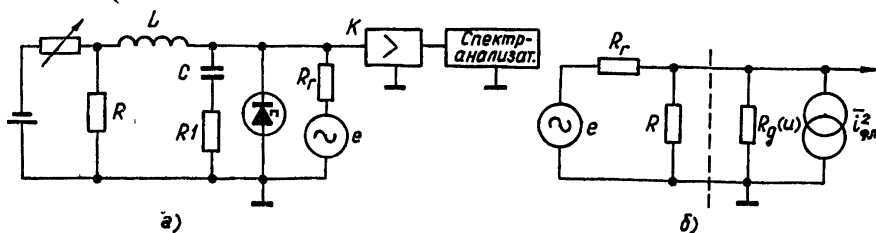


Рис. 1.

[4, 5]. Непосредственное подключение к ТД малошумящего широкополосного усилителя (с коэффициентом усиления  $K$ ), на выходе которого включен спектр-анализатор, позволяет измерять флуктуации тока диода на частотах, определяемых лишь частотными свойствами измерительной цепи. Источник регулируемого переменного напряжения  $e$  вместе с сопротивлением  $R_r$  необходимы для калибровки измерений. Без учета шунтирующего действия на контур входного сопротивления усилителя и балластного сопротивления цепи питания эквивалентная схема измерительной цепи и ТД для флуктуационных составляющих имеет вид, показанный на рис. 1 б. Из этой схемы при  $e = 0$ ,  $R_r \gg R/(1 + R/R_d)$  и при известном напряжении на выходе усилителя  $u_{\text{ВМХ}}^2$  найдем, что

$$\sqrt{i_{\text{Фл}}^2} = \sqrt{u_{\text{ВМХ}}^2 (1 + R/R_d)/KR}.$$

Величину  $R_d = R_d(u)$  можно определить при любом значении  $u$ , установив такое напряжение  $e_i$ , чтобы на выходе усилителя было напряжение  $v_i$ , превышающее измеренное напряжение шумов  $\sqrt{u_{\text{ВМХ}}^2}$  примерно на порядок. В этом случае

$$v_i \approx \frac{e_i}{R_r} \frac{R}{1 + R/R_d}.$$

Учитывая это соотношение и обозначая  $v_i/e_i = K_i$ , найдем для  $R_d(u)$  и спектральной плотности флуктуаций тока ТД следующие выражения:

$$R_d(u) = \frac{R}{(R/R_r K_i) - 1},$$

$$W_i(F) = \frac{\overline{u_{\text{ВМХ}}^2}}{(K K_i R_r)^2} \frac{1}{\Delta F},$$

где  $F$  — частота анализа,  $\Delta F$  — полоса пропускания спектра-анализатора. Отметим, что погрешность измерения  $R_d(u)$  с помощью изложенного способа не превышает 7 — 12%.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные зависимости спектральной плотности флуктуаций тока ТД  $W_i(u)$  на низшей частоте анализа  $F = 2 \text{ Гц}$  приведены на рис. 2, 3. Для диодов АИ301А и ЗИ306Г аналогичные характеристики имеют значительно более плавный вид с минимумом при  $u \approx 0,2 \text{ В}$ , а их разброс занимает промежуточное положение между зависимостями рис. 2 и 3 (приведенные кривые отражают разброс характеристик партии ТД из 10 штук каждого типа). В отличие от германиевых ТД [2], у которых пики шумового тока наблюдались только при температурах 77 К, у диодов из GaAs они могут иметь место и при комнатной температуре [6]. Такая возможность подтверждается отдельными экземплярами диодов АИ101В, причем для некоторых из них, как отмечалось и в [6], зависимости  $W_i(u)$  имеют два экстремума.

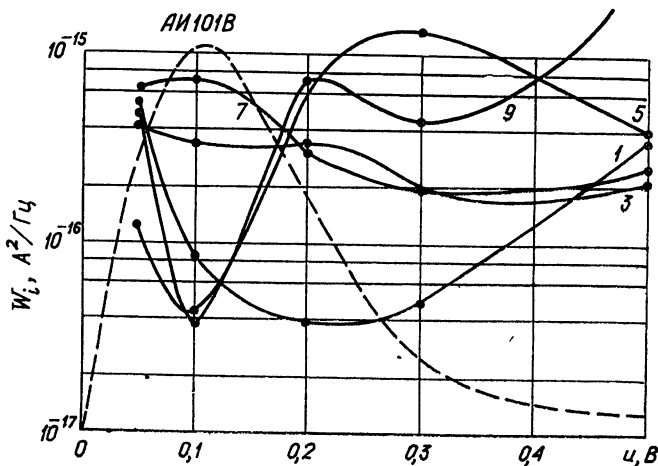


Рис. 2.

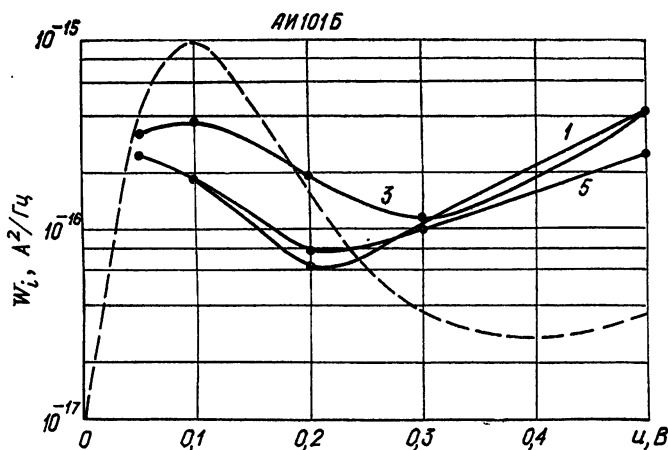


Рис. 3.

Характер кривых  $W_i(u)$  для всех исследованных диодов показывает, что при  $u < u_b$  имеет место известное для области напряжений  $u > u_b$  положение об отсутствии пропорциональности  $1/f$ -шумов ТД квадрату среднего тока. Интенсивность низкочастотных флуктуаций

в области впадины статической характеристики и на ее диффузионной ветви связывают в первую очередь с величиной избыточных токов ТД. Так, для диодов из Ge установлено [1, 7], что в области  $u > u_b$   $\bar{i}_{\text{фл}}^2 \sim i_{\text{изб.э}}^2$ , причем  $i_{\text{изб.э}} \sim \exp(bu)$ ,  $b$  — коэффициент пропорциональности.

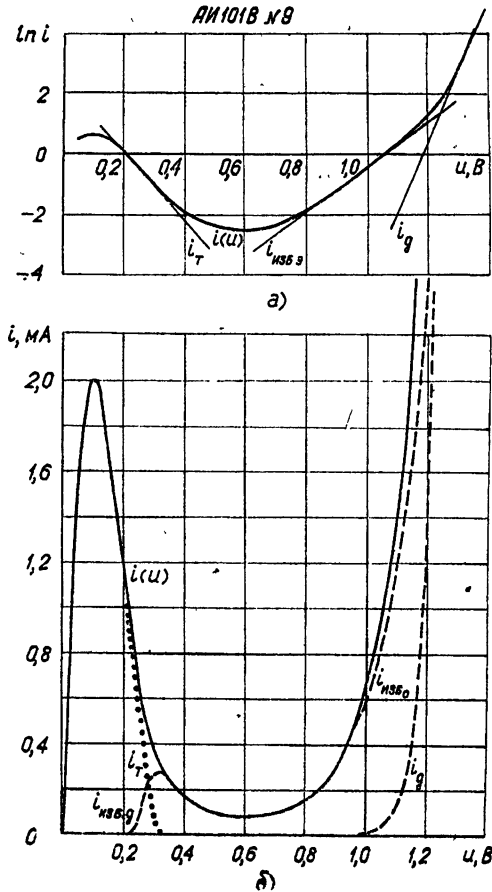


Рис. 4.

Для установления зависимости между  $W_i$  и  $i_{\text{изб}}$  — полным избыточным током ( $i_{\text{изб}} = i_{\text{изб.э}} + i_{\text{изб.д}}$ , где  $i_{\text{изб.э}}$ ,  $i_{\text{изб.д}}$  — избыточные токи диффузионной ветви и долины (впадины) вольт-амперной характеристики диода [8]), необходимо в первую очередь найти функцию  $i_{\text{изб}}(u)$ . Для этого согласно [7] воспользуемся графиком рис. 4 а, на котором хорошо видны участки экспоненциальных зависимостей диффузионного  $i_d$ , избыточного  $i_{\text{изб.э}}$  и туннельного  $i_T$  токов от напряжения смещения. Определив из этого рисунка  $i_d(u)$ , найдем и построим (рис. 4 б)  $i_{\text{изб.э}} = i(u) - i_d |_{u > u_b}$ . Ток  $i_{\text{изб.д}}$ , также приведенный на рис. 4 б, определялся из соотношения  $i_{\text{изб.д}} = i(u) - i_T |_{u < u_b}$ , причем туннельная компонента тока аппроксимировалась выражением  $i_T = \frac{I_p}{4} \frac{u}{u_p} \left(3 - \frac{u}{u_p}\right)^2$  ( $u_p$ ,  $I_p$  — координаты максимума характеристики  $i(u)$ ), дающим хорошее совпадение с экспериментальными результатами

для ТД из различных материалов [8, 9]. Построенный полный избыточный ток, описываемый для соответствующих напряжений смещения выражением  $i_{нзб} = i(u) - i_d - i_T$ , совпадает с характеристикой  $i(u)$  во всей области впадины. Зависимости  $i_{нзб}(u)$  у всех исследованных диодов приблизительно одинаковы, причем наибольшие отклонения между ними наблюдаются в области диффузионных токов. Сопоставление характера кривых  $i_{нзб}(u)$  и  $W_i(u)$  для различных типов ТД (рис. 2, 3) показывает отсутствие у диодов из GaAs закономерной связи между этими зависимостями.

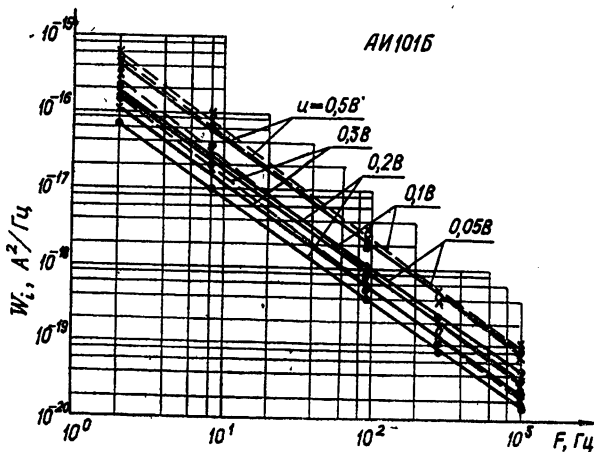


Рис. 5. Сплошная линия—№ 1, штриховая линия—№ 3.

Вместе с тем, частотные характеристики  $W_i(F) |_{u=\text{const}}$  у всех исследованных ТД имеют четко выраженные зависимости вида  $W_i(F) \sim 1/F^u$  (рис. 5) при различных значениях параметра  $u$ . Для многих практических целей, например для анализа флуктуационных процессов в смесительных и генераторных устройствах, оказывается необходимым знание не только экспериментальных результатов, но и аналитической зависимости  $W_i(u, \omega)$  как функции переменных  $u$  и  $\omega$ . Получить такую зависимость при наличии режимных и частотных характеристик шумов (необязательно низкочастотных) можно, воспользовавшись известным представлением тока ТД в виде

$$i(u) = \sum_{k=1}^p a_k u^k = \sum_{k=1}^p (\bar{a}_k + \Delta a_k(t)) u^k = i_p + i_\phi(u, t),$$

где  $\bar{a}_k$ ,  $\Delta a_k(t)$ — среднее значение и флуктуации параметра  $a_k$ ,

$$i_p = \sum_{k=1}^p \bar{a}_k u^k, \quad i_\phi(u, t) = \sum_{k=1}^p \bar{a}_k \xi_k(t) u^k, \quad (1)$$

$\xi_k(t) = \frac{\Delta a_k(t)}{\bar{a}_k}$  — относительные флуктуации параметра  $a_k$ .

При предположении о стационарности и стационарной связанности флуктуаций  $\xi_k(t)$  можно получить [10] выражение для спектральной плотности флуктуаций тока:

$$W_i(\omega) = \sum_{k=1}^p \bar{a}_k^2 u^{2k} W_{\xi_k}(\omega) + 2 \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p a_i a_j u^{i+j} W_{\xi_i \xi_j}^0(\omega), \quad (2)$$

где  $W_{\xi_i \xi_j}^0(\omega)$  — четная составляющая взаимного спектра  $W_{\xi_i \xi_j}(\omega)$  функций  $\xi_i(t)$  и  $\xi_j(t)$ .

Из (2) следует, что при  $W_{\xi_k}(\omega) = W_{\xi_i \xi_j}^0(\omega)$  имеет место зависимость  $W_i(\omega) \sim i_p^2$ , наблюдающаяся, как известно, у некоторых типов электронных ламп и резисторов.

Для ТД, как следует из рис. 2, 3, 5, такая зависимость отсутствует, но закон изменения спектральной плотности флуктуаций тока от частоты сохраняется при различных средних токах (напряжениях) диода. Поэтому можно предположить, что выполняются соотношения

$$W_{\xi_k}(\omega) = A_k W_{\xi}(\omega) \quad \text{и} \quad W_{\xi_i \xi_j}^0(\omega) = A_i A_j W_{\xi}(\omega), \quad (3)$$

где  $A_k, A_i, A_j$  — коэффициенты пропорциональности,  $W_{\xi}(\omega)$  — спектральная плотность некоторой безразмерной функции  $\xi(t)$ . В этом случае из (2) находим

$$W_i(\omega) = f^2(u) W_{\xi}(\omega), \quad (4)$$

где

$$f^2(u) = \sum_{k=1}^p A_k \bar{a}_k^2 u^{2k} + 2 \sum_{i=1}^p \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^p \bar{a}_i \bar{a}_j A_i A_j u^{i+j}.$$

Выражение (4) находится в соответствии с характером изменения спектральной плотности флуктуаций тока, представленным на рис. 5 и приведенным в [4] для германиевых ТД, что подтверждает возможность представления (3). Выражение (4) можно получить и при нестационарных  $\Delta a_k(t)$ , используя соответствующий аппарат анализа [10, 11]. Заметим, что соотношение (4) для конкретных зависимостей  $f(u)$  и  $W_{\xi}(\omega)$  описывает спектры флуктуаций токов теплового ( $W_{i_T}(\omega) = 4KT$ ), дробового ( $W_{i_{др}}(\omega) = 2eI$ ) и фликкерного ( $W_{i_{фл}}(\omega) = AI^{\beta} \omega^{-\alpha}$ ) происхождений. Очевидно, что для ТД из Ge, когда, как отмечалось выше, имеет место соотношение  $W_i(u) \sim i_{изб}^2$ , функция  $f^2(u) = i_{изб}^2$ , а  $W_{\xi}(\omega) = m \omega^{-\alpha}$ , где  $m$  — единичный коэффициент с размерностью величины  $W_i(\omega) \omega^{\alpha} i_{изб}^{-2}$ .

Приведенный формальный вывод (4) подтверждает известное предположение, что флуктуации тока диода обусловлены флуктуациями его проводимости. К такому заключению можно прийти, поделив (1) на  $u$  и приняв во внимание размерность параметра  $a_1$ . Флуктуации проводимости со спектром вида  $\omega^{-\alpha}$  могут быть объяснены на основе результатов, полученных в [12], где показано, что причина этих флуктуаций в резких  $p$ — $n$ -переходах является старение (деградация) перехода из-за диффузии примесей с большими коэффициентами диффузии, что, как отмечается в [8], гл. 4, может иметь место в ТД на GaAs.

Для практических целей соотношение (4) может быть найдено по приближенным значениям  $f^2(u)$  и  $W_{\xi}(\omega)$ . Для этого сначала отыскивается зависимость  $W(\xi, \omega)$ , наилучшим образом (с точки зрения какого-либо критерия, например наименьших квадратов), отражающая характер каждой из экспериментальных частотных характеристик  $W_i(\omega)|_{u=u_k}$  (рис. 5), а функция  $f^2(u)$  находится затем путем аппроксимации отношения  $W_i(u, \omega_k)/W_{\xi}(\omega_k)$ , в котором  $W_i(u, \omega_k)$  — экспериментальная кривая, снятая при  $\omega = \omega_k$  (рис. 2, 3).

«Средние» частотные характеристики  $W_i(F)$ , рассчитанные по

экспериментальным для 10 диодов каждого из исследованных типов, приведены на рис. 6, а в табл. 1 указаны разбросы значений коэффициентов выражений для абсолютных флуктуаций тока диода  $W_i(F) = BF^{-\alpha}$  и относительных флуктуаций  $W_{\%i}(F) = AF^{-\alpha}$ ,  $A = BI_0^2$ . Величины  $I_0$  выбирались равными 0,65 и 1,3 мА, что соответствует серединам отрицательных участков вольт-амперных характеристик диодов с пиковыми токами 1 и 2 мА.

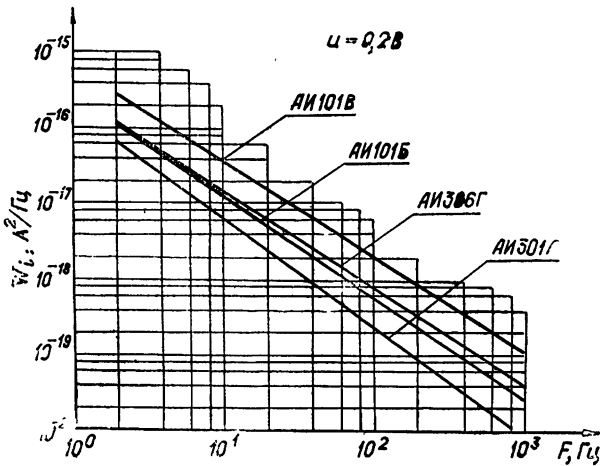


Рис. 6.

Таблица 1

Тип ТД	ЗИ306Г	АИ101В	АИ301А	АИ101Б
$A, 1/\text{Гц}$	$7,1 \cdot 10^{-11} \div$ $\div 3,25 \cdot 10^{-10}$	$4,73 \cdot 10^{-11} \div$ $\div 1,1 \cdot 10^{-9}$	$5,92 \cdot 10^{-11} \div$ $\div 1,48 \cdot 10^{-10}$	$4,02 \cdot 10^{-10} \div$ $\div 1,3 \cdot 10^{-9}$
$B, A^2/\text{Гц}$	$(1,2 \div 5,5) \cdot 10^{-16}$	$1,05 \cdot 10^{-16} \div$ $\div 1,25 \cdot 10^{-15}$	$(1+2,5) \cdot 10^{-16}$	$(1,7+5,5) \cdot 10^{-16}$
$\alpha$	1,23+1,37	1,08+1,47	1,33+1,49	1,31+1,44

Сравнение коэффициентов  $\alpha$  и  $A$  с данными [13] показывает, что у электронных ламп нижняя граница разброса значений коэффициента  $\alpha \approx 0,6 \div 0,7$  значительно ниже, чем у ТД, а коэффициент  $A$ , соответствующий значениям  $W_{\%i}$  на  $f = 1 \text{ Гц}$ , у ТД выше примерно на 1,5—2 порядка.

Из анализа результатов исследований  $1/f$ -шума (см. [14] и библиографию к ней) следует, что у маломощных транзисторов  $B \approx (10^{-14} \div 10^{-16}) A^2/\text{Гц}$ , т. е. значение верхней границы этого разброса примерно на порядок больше, чем у ТД. Область значений коэффициента  $\alpha$  у транзисторов шире, чем у ТД и составляет  $\alpha = 0,5 \div 2$ . По данным наших исследований, у маломощных транзисторов П27, П28, 1Т308А  $\alpha = 1 \div 2,2$ ,  $B = (2 \div 4) \cdot 10^{-16} A^2/\text{Гц}$ , что соответствует значениям коэффициента  $B$  для большинства исследованных ТД.

Проведенные исследования показали, что у слаботочных арсенид-галлиевых ТД спектральная плотность низкочастотных флуктуаций тока описывается зависимостью  $W_i(u, F) = f^2(u)mF^{-\alpha}$ , причем нелинейная функция  $f^2(u)$  не пропорциональна среднему или избыточному току диода. Фликкерный характер шумов тока туннельных диодов обусловлен флуктуациями проводимости  $p-n$ -перехода и наблюдается, как и у маломощных транзисторов, на частотах от нулевых до нескольких килогерц, причем абсолютные значения интенсивностей шумов этих приборов практически одинаковы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Фетина, Радиотехника и электроника, 8, № 10, 1796 (1963).
2. В. Н. Фетина, Радиотехника и электроника, 11, № 9, 1651 (1966).
3. M. D. Burhard and E. F. Sidor, Proc. IRE, 50, № 12, 2487 (1962).
4. R. A. Gillon, Electron. Engineering, 36, № 441, 766 (1964).
5. В. К. Костомаров, О. Б. Оржевский, в сб. Исследование качества и точности измерений параметров полупроводниковых диодов, 1969.
6. M. D. Mountgomery, J. Appl. Phys., 32, № 11, 2408 (1961).
7. Ядзима, Эсаки, в сб. Туннельные диоды, под ред. В. И. Фистуля, ИЛ, М., 1961, стр. 121.
8. С. М. Зи, Физика полупроводниковых приборов, изд. Энергия, М., 1973.
9. Н. А. Белова и др., Туннельные диоды, изд. Наука, М., 1966.
10. Б. Р. Левин, Теоретические основы статистической радиотехники, кн. 1, изд. Сов. радио, М., 1974.
11. А. Н. Малахов, Флуктуации в автоколебательных системах, изд. Наука, М., 1968.
12. А. Н. Малахов, А. В. Якимов, Радиотехника и электроника, 19, № 11, 2436 (1974).
13. А. И. Чикин, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 3, № 3, 419 (1960).
14. А. К. Нарышкин, А. С. Врачев, Теория низкочастотных шумов, изд. Энергия, М., 1972.

Ленинградский политехнический институт

Поступила в редакцию  
17 марта 1976 г.

#### MEASUREMENT OF LOWFREQUENCY NOISES OF TUNNEL DIODE

*Yu. A. Vasil'ev, V. A. Shcheglov*

A method is suggested and results of experimental investigation of flicker fluctuations of weak-current arsenide-gallium tunnel diodes in the region of negative conductivity of the volt-ampere characteristic are given.