

Биспектр 1/f шума в GaAs эпитаксиальных пленках

А.В.Беляков, А.В.Моряшин, М.Ю.Перов, Л.К.Дж.Фандамме^{*1}, А.В.Якимов²

*Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского
проспект Гагарина 23, Нижний Новгород 603950, Россия*

**Eindhoven University of Technology, 5600MB Eindhoven, The Netherlands*

Мы исследуем биспектр 1/f шумового напряжения в GaAs эпитаксиальных пленках, изготовленных в Технологическом Университете Эйндховена (Нидерланды). С этой целью создана специальная измерительная установка. Спектр шума описывается параметром Хоухе $\alpha=4\cdot 10^{-5}$ и имеет параметр формы $\gamma_s=0,99$. Абсолютное значение биспектра $|B_v(f_1, f_2)|$ возрастает при уменьшении частот в первом квадранте плоскости $Of_1 f_2$. На биссектрисе частот $f_1 = f_2 = f$ найдено аппроксимирующее выражение: $|B_v|/V^3 = B_1/f^{1,21}$ [Гц⁻²], где $B_1=3,35\cdot 10^{-23}$. Анализ экспериментальных результатов выполнен в рамках модели двухуровневых систем (ДУС). Каждая ДУС описывает поведение подвижного дефекта, имеющего два метастабильных состояния. Полный шум (при определенных условиях) имеет 1/f спектр. Форма биспектра шума в эксперименте и модели различна. Количество дефектов, необходимое для объяснения спектра измеренного шума, порядка $5\cdot 10^4$. В модели это соответствует биспектру с “высотой” $B_1=7\cdot 10^{-25}$, что примерно в 50 раз меньше экспериментального результата.

1. Введение

Большинство полупроводниковых приборов имеет 1/f шум, обусловленный подвижными дефектами. Найдено, что нулевая гипотеза (о гауссовости и стационарности) 1/f шума часто не выполняется [1]. Предполагается, что 1/f шум стационарный и негауссовый. Для исследования негауссовости шума используется биспектр, который равен нулю для гауссовых процессов.

Мы рассматриваем Фурье-преобразование $\chi_n(f)$ шума $v(t)$ на отрезке времени T :

$$\chi_n(f) = \int_{t+(n-1)T}^{t+nT} v(t) e^{-i2\pi ft} dt, n = \overline{1, N}. \quad (1)$$

Здесь $N\cdot T$ – полная длительность реализации шума, состоящая из N кусков, используемых для получения набора усредняемых спектрограмм, t – время начала записи шума.

Оценки спектра $S_v(f)$ и биспектра $B_v(f_1, f_2)$ представлены, соответственно, выражениями (2) и (3):

¹ Тел.: +31.40.247 3242; Fax: +31.40.243 0712; E-mail: L.K.J.Vandamme@ele.tue.nl

² Тел.: +7-8312-656153; Fax: +7-8312-656416; E-mail: yakimov@rf.unn.ru

$$S_v(f) = \frac{2}{NT} \sum_{n=1}^N |\chi_n(f)|^2, \quad (2)$$

$$B_v(f_1, f_2) \equiv |B_v(f_1, f_2) \exp[j\Phi_v(f_1, f_2)]| = \frac{1}{NT} \sum_{n=1}^N \chi_n(f_1) \chi_n(f_2) \chi_n^*(f_1 + f_2). \quad (3)$$

Мы исследовали шум *GaA*-пленок, описанных в [1]. Шум напряжения оцифровывался и записывался на жесткий диск компьютера.

В добавление к спектру $S_v(f)$ исследовано абсолютное значение $|B_v(f_1, f_2)|$ и бифаза $\Phi_v(f_1, f_2)$ биспектра. Для этой цели разработана специальная измерительная установка [2].

2. Экспериментальные результаты

Спектр шумового напряжения показан на рис.1. Компонента шума вида $1/f$ описывается эмпирическим выражением [3] с параметром Хоухе $\alpha = 4 \cdot 10^{-5}$ и параметром формы спектра $\gamma_S = 0,99$.

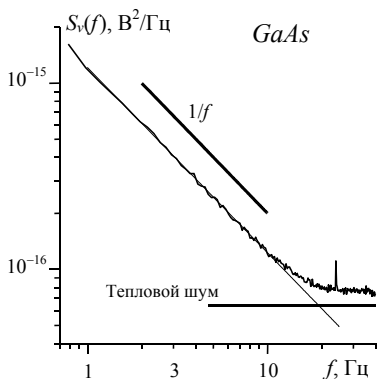


Рис.1 Спектр шумового напряжения

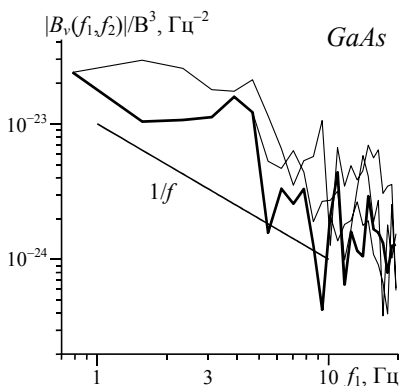


Рис.2 Модуль биспектра шумового напряжения

Модуль биспектра $|B_v(f_1, f_2)|$ в первом квадранте частотной плоскости Of_1f_2 возрастает при уменьшении частот. Сечения $|B_v(f_1, f_2)|$ плоскостями $f_2 = \text{const}$ показаны на рис.2 для следующих значений частот f_2 (Гц): 0,78; 4,69; 10,16. Жирной линией изображено диагональное сечение $f_1 = f_2 = f$ модуля усредненного биспектра.

Аппроксимация для $f_2 = 0,78$ Гц имеет вид $|B_v(f_1, f_2)|/V^3 = 6,21 \cdot 10^{-23} / f_1^{1,07}$, Гц⁻². Таким образом, параметр формы сечения модуля биспектра равен $\gamma_{B1} = 1,07$, которое близко значению, полученному для спектра $\gamma_S = 0,99$, рис.1. Аппроксимация диагонального сечения $f_1 = f_2 = f$ представлена следующим выражением:

$$|B_v(f, f)|/V^3 = B_1 / f^\gamma, \text{ Гц}^{-2}. \quad (4)$$

Здесь $V=0,18$ В, $B_1=3,35 \cdot 10^{-23}$ и параметр формы биспектра $\gamma \equiv \gamma_B=1,21$.

Измерена бифаза шумового напряжения $\Phi_v(f_1, f_2)$ (3). Она имеет вид случайной функции частот f_1 и f_2 . Величина бифазы медленно меняется в течение нескольких периодов. Это означает, что биспектр измеренного шума $B_v(f_1, f_2)$ является комплексной функцией, причем действительная и мнимая части принимают как положительные, так и отрицательные значения.

“Развернутая” бифаза биспектра на бисектрисе первого квадранта частотной плоскости Of_1f_2 , $f_1=f_2=f$ приведена на рис.3. Затемненные области показывают значения бифазы на дополнительных “положительных” и “отрицательных” периодах, соответственно: $0,5 \leq \Phi_v/(2\pi) < 1,5$ (период “+1”), и $\Phi_v/(2\pi) < -0,5$ (период “-1”).

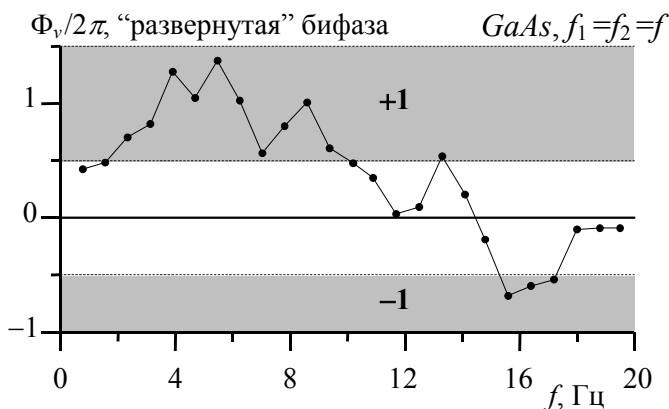


Рис.3. Бифаза шума GaAs-эпитаксиальных пленок в зависимости от частоты на диагонали Of_1f_2

При интегрировании действительной части биспектра $\text{Re}[B_v(f_1, f_2)]$ по всей области частот получено, что коэффициент асимметрии составляет $\gamma_3 = -0,4$ процента. Прямой метод оценивания статистического момента шума дал следующий результат: $\gamma_3 = -0,2$ процента. Таким образом, несмотря на большие ошибки вычислений, полученный результат характеризует достоверность биспектральных измерений.

Для того чтобы лучше понять экспериментальные результаты, рассмотрим биспектр в разных моделях шума.

3. Теоретический анализ

Для полупроводников существует модель двухуровневых систем (ДУС), где подвижные дефекты могут находиться в одном из двух метастабильных состояний. Переходы между состояниями происходят быстро по сравнению со временем пребывания в них. Следовательно, передвижения дефектов могут быть описаны случайным телеграфным процессом (СТП). Предполагается, что число дефектов вели-

ко. Переключение состояния каждой ДУС меняет сечение рассеяния электронов. Спектр СТП имеет лоренцев вид [4]. Полный шум (при определенных условиях [5]) имеет спектр вида $1/f$.

К сожалению, биспектр $1/f$ шума в модели СТП найти трудно. Для оценки биспектра создана вспомогательная пуассоновская модель $1/f$ шума. Биспектр пуассоновского процесса может быть вычислен при помощи Фурье-преобразования элементарного импульса процесса [6].

Для моделирования поведения одного подвижного дефекта в соответствии с единичным СТП использовался отдельный пуассоновский процесс. Поэтому выбран прямоугольный элементарный импульс. Плотность вероятности длительности импульса, как и у СТП, представлена распределением Больцмана. Частота возникновения импульсов одинакова для пуассоновского процесса и СТП.

Мы использовали ансамбль пуассоновских процессов, характеризующийся плотностью вероятности средней длительности импульса в отдельном процессе $W_\tau(\tau) \sim 1/\tau$, как и в модели Ван дер Зила и Дю Пре [5].

Спектры шума во вспомогательной модели и модели СТП имеют $1/f$ вид. Из-за возможности перекрытия импульсов в пуассоновской модели спектры отличаются постоянным множителем. Дополнительно исследована модель Халфорда пуассоновской суперпозиции прямоугольных импульсов для $1/f$ шума [7].

Биспектры во вспомогательной модели и в модели Халфорда имеют нулевую мнимую часть и одинаковые частотные зависимости. Зависимость биспектра на диагонали частотной плоскости, $f_1 = f_2 = f$ имеет вид (4), но с параметром формы биспектра $\gamma_B = 2$. Таким образом, форма измеренного биспектра отличается от формы биспектра шума в рассмотренных моделях.

При определении уровня биспектра B_1 на частоте 1 Гц использована оценка биспектра $1/f$ шума в модели ДУС [8]. На основе этой оценки количество дефектов и соответствующих им ДУС удовлетворяет величине измеренного спектра $S_v(f)$ и составляет порядок $5 \cdot 10^4$. Данное число дефектов приводит к $B_1 = 7 \cdot 10^{-25}$. Эта величина примерно в 50 раз меньше экспериментального результата $B_1 = 3.35 \cdot 10^{-23}$.

4. Выводы

Если результаты нашего исследования достоверны, можно сделать вывод, что $1/f$ шум в *GaAs* эпитаксиальных пленках не является ни пуассоновским процессом, ни суперпозицией СТП. Таким образом, необходимо выполнить дополнительные исследования.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке НАТО в рамках программы “Наука для Мира”, проект SfP-973799 между Нижегородским Государственным Университетом и Техническим университетом Эйндховена (Нидерланды) как партнерами. Работа также поддержана грантами РФФИ 00-15-96620, 01-02-16666 и “Ведущие научные школы” № НШ-1729.2003.2.

Литература

- [1] Yakimov A.V., Hooge F.N. "A simple test of the Gaussian character of noise" //Physica B. 2000. V.291, No.2. P. 97–104.
- [2] Андронов А.А., Беляков А.В., Гурьев В.А., Якимов А.В. "Интерактивная визуальная разработка приложений автоматизации научных и промышленных измерительно-управляющих систем в среде LabVIEW 6i National Instruments" //В кн.: Труды 2-го рабочего совещания по проекту NATO SfP-973799 Полупроводники. Апрель 2002 г. /Ред. А.В.Якимов. –Нижний Новгород: ТАЛАН, 2002, с.38–46;
– А.А.Андронов, А.В.Беляков, В.А.Гурьев и А.В.Якимов. "The interactive visual development of applications of automation scientific and industrial measuring and control systems by means of LabVIEW 6i National Instruments" //Proc. of the NATO Project SfP-973799 Semiconductors 2nd Workshop, April 2002 /Ed. A.V.Yakimov. –Nizhni Novgorod, TALAM-Press, 2002, p.38–46;
<http://www.rf.unn.ru/NATO/index.html>.
- [3] F.N.Hooge, T.G.M.Kleinenpenning, and L.K.J.Vandamme. "Experimental studies on $1/f$ noise" //Reports on Progress in Physics. 1981. V.44, No.3. P.479–532.
- [4] S.Machlup. "Spectrum of two-parameter random signal" //J. of Applied Physics. 1954. V.25, No.3. P.341–343.
- [5] A.van der Ziel. "On the noise spectra of semi-conductor noise and of flicker effect" //Physica. 1950. V.16, No.4. P.359–372.
- [6] Л.П.Зачепиская. "О возможной некорректности замены асимптотически нормальных случайных процессов строго нормальными при инерционном линейном преобразовании" //Радиотехника и электроника. 1971. Т.16, №.4. С.627–630.
- [7] D.Halford. "A general mechanical model for $|f|^{\alpha}$ spectral density random noise with special reference to flicker noise $1/|f|$ " //Proc. IEEE. 1968. V. 56. P.251–258.
- [8] V.B.Orlov and A.V.Yakimov. "The further interpretation of Hooge's $1/f$ noise formula" //Physica. 1990. V.162B. P.13–20.

Bispectrum of the 1/f noise in GaAs epitaxial films

A.V.Belyakov, A.V.Moryashin, M.Yu.Perov, L.K.J.Vandamme^{*1}, A.V.Yakimov²

Nizhni Novgorod State University, Gagarin Avenue 23, Nizhni Novgorod 603950, Russia

^{}Eindhoven University of Technology, 5600MB Eindhoven, The Netherlands*

We investigate the bispectrum of the 1/f voltage noise from GaAs epitaxial films made in Eindhoven University of Technology (The Netherlands). The specially designed set-up was used for this purpose. The spectrum is well described by the Hooge's parameter $\alpha=4\cdot 10^{-5}$ and the frequency exponent $\gamma_s=0.99$. The bispectrum absolute value $|B_v(f_1, f_2)|$ tends to the increase towards low frequencies in the first quadrant in the plain of frequencies $Of_1 f_2$. On the bisector, $f_1 = f_2 = f$, it is approximated by relation $|B_v|/V^3 = B_1/f^{1.21}$ [Hz⁻²], where $B_1=3.35\cdot 10^{-23}$. The experimental results were analyzed in frames of the TLS (Two Level System) model of the noise. Each TLS is associated with some mobile defect that can be switched between two meta-stable states. The total noise (under the known conditions) has the spectrum of the 1/f type. The shape of the bispectrum is different for the experimental data and model considered here. The number of defects, which is necessary for the explanation of the measured spectrum, is of the order $5\cdot 10^4$. That yields $B_1=7\cdot 10^{-25}$ – nearly 50 times less as compared with the result of our measurements.

1. Introduction

At present time nanodimensional semiconductor devices belong developing branch of nanoelectronics. The light emitting diodes (LEDs) and lasers based on self-organized quantum dots (QD) are very promising devices in this field. It is suggested that the diodes have to function at higher temperatures with less temperature sensitive operation and with an enhanced radiation hardness. Development and manufacturing of such type of structure base on investigation of quantum well devices and theirs properties.

Most of semiconductor devices have 1/f noise probably caused by mobile defects. It is found that the zero-hypothesis (about the Gaussianity and stationarity) for 1/f noise in semiconductors often is not fulfilled [1]. The 1/f noise was suggested to be stationary and non-Gaussian. To investigate the non-Gaussianity of 1/f noise the bispectrum is used. This one equals zero for Gaussian processes.

We consider the Fourier transform $\chi_n(f)$ of noise $v(t)$ "truncated" by time block T as it is presented in eq. (1). Here $N\cdot T$ is the total length of the analyzed noise record, while treating it is divided onto N pieces.

The value t in low and upper limits of integration is the time of the recording start. The estimations of the spectrum $S_v(f)$ and bispectrum $B_v(f_1, f_2)$ are described by the equations (2) and (3), respectively.

We have studied the noise from the same GaAs epitaxial films as in ref. [1]. The voltage noise $v(t)$ was sampled and recorded onto hard disk of PC. In addition to the spec-

¹ Phone: +31.40.247 3242; Fax: +31.40.243 0712; E-mail: L.K.J.Vandamme@ele.tue.nl

² Phone: +7-8312-656153; Fax: +7-8312-656416; E-mail: yakimov@rf.unn.ru

trum $S_v(f)$ the absolute value $|B_v(f_1, f_2)|$ and biphasе $\Phi_v(f_1, f_2)$ of the bispectrum were analyzed. The specially designed set-up [2] was used for this purpose.

2. Experimental results

The spectrum of the voltage noise is shown in Fig.1. The $1/f$ noise component is described by the empirical relation [3] with the Hooge's parameter $\alpha=4\cdot 10^{-5}$, and the frequency exponent $\gamma_S=0.99$.

The absolute value of the bispectrum $|B_v(f_1, f_2)|$ tends to the increase towards low frequencies in the first quadrant in the plain Of_1f_2 . The cross-sections by coordinate lines $f_2=const$ are shown in Fig.2. The following frequencies f_2 are selected here (Hz): 0.78, 4.69, and 10.16. The bold line shows the meanings at the bisector, $f_1=f_2=f$.

Best fit for $f_2 = 0.78$ Hz is $|B_v(f_1, f_2)|/V^3 = 6.21\cdot 10^{-23}/f_1^{1.07}$, Hz⁻². Thus, the frequency exponent is $\gamma_{B1}=1.07$. This value is close to the frequency exponent $\gamma_S=0.99$ found for the spectrum, Fig.1. On the bisector, $f_1=f_2=f$, the best fit is presented by equation (4): $|B_v(f, f)|/V^3 = B_1/f^\gamma$, Hz⁻². Here $V=0.18$ Volt, $B_1=3.35\cdot 10^{-23}$, and the frequency exponent γ is $\gamma_B=1.21$.

Additionally, the biphasе $\Phi_v(f_1, f_2)$ of the voltage noise was measured (3). This biphasе is like a random function of frequencies f_1 and f_2 . The magnitude of the biphasе fluctuates slowly within a few cycles. This result means the bispectrum $B_v(f_1, f_2)$ of the measured noise is a complex function. It has real and imaginary parts, and both of them fluctuate between positive and negative values.

The unwrapped biphasе measured on the bisector, $f_1=f_2=f$, of the first quadrant in the plain of frequencies Of_1f_2 is shown in Fig.3. The regions are shadowed in which the biphasе is wrapped onto one additional circle up or down correspondingly, $0.5 \leq \Phi_v/(2\pi) < 1.5$ (that is region "+1"), and $\Phi_v/(2\pi) < -0.5$ (region "-1").

Integrating the real part of the bispectrum, $\text{Re}[B_v(f_1, f_2)]$, we estimate the skewness as $\gamma_3=-0.4$ percent. This result compared with $\gamma_3=-0.2$ percent found from direct evaluation of statistical moments of the noise suggests our bispectral measurements are rather reliable despite the large error as compared with the spectral measurement.

In order to better understand experimental results we need to know the bispectrum in some models of the noise.

3. Theoretical analysis

There is the TLS (Two Level System) model in semiconductors where some mobile defect can be in one of two meta-stable states. The transitions between these states are very fast as compared to the time in the meta-stable state. Therefore, movements of defect can be described by the random telegraph signal (RTS). The number of defects is supposed to be large. Thus, noise is created by superposition of RTS type changes in the scattering of electrons. The RTS spectrum is described by Lorentz curve [4]. The total noise (under the known conditions [5]) has the spectrum of the $1/f$ type.

Unfortunately, the bispectrum of the $1/f$ noise is very difficult to deduce in the RTS model. To estimate the bispectrum the auxiliary Poissonian model of the $1/f$ noise has

been constructed. The bispectrum of any Poissonian process can be found through the Fourier transform of the elementary impulse of the process [6].

One Poissonian process is used to model the behavior of one mobile defect, and it is corresponded to a single RTS. That is why the rectangle elementary impulse has been chosen for this process. The *pdf* of the impulse duration in the modeling of one defect is of Boltzman type like it is for the single RTS. The frequency of appearance of impulses is the same both for the Poissonian process and RTS.

We use the ensemble of Poissonian processes with the *pdf* of mean impulse duration $W_\tau(\tau) \sim 1/\tau$ as it is in models by Van der Ziel and Du Pre [5].

Spectra in models of RTS and Poissonian processes are of the $1/f$ type. The possibility of the overlapping of impulses in Poissonian process causes some numerical difference between spectra because impulses are not overlapped in the case of RTS.

Additionally, the model of the $1/f$ noise by Halford [7] for the Poissonian superposition of rectangular impulses was analyzed.

Bispectra in the auxiliary model and model by Halford have zero imaginary part and similar dependences on both frequencies. On the bisector, $f_1 = f_2 = f$, this dependence is of the type given by eq. (4), but with the frequency exponent $\gamma_B = 2$. Thus, the shape of the bispectrum is different for the experimental data and models considered here.

In order to estimate the height B_1 of the modeled bispectrum we use the TLS-model [8] of the $1/f$ noise. It gives the number of defects, which form the TLSs in the film and is necessary for the explanation of the magnitude of the measured spectrum $S_v(f)$, to be of the order $5 \cdot 10^4$. The same quantity of defects yields $B_1 = 7 \cdot 10^{-25}$. This magnitude is nearly 50 times less as compared with the result of our measurements $B_1 = 3.35 \cdot 10^{-23}$.

4. Conclusions

If results of our investigations are reliable, we can conclude that the $1/f$ noise in *GaAs* epitaxial films is neither Poissonian process nor the superposition of random telegraph signals. Thus, the additional investigation on the $1/f$ noise Gaussianity is to be made.

Acknowledgements

This investigation was supported by the NATO in the framework of the "Science for Peace" Project SfP-973799 with the universities of Nizhni Novgorod and Eindhoven as partners. The work was also supported by grants of RFBR 00-15-96620, 01-02-16666, and NSh-1729.2003.2 (Scientific Schools).