# НЧ шумы в светоизлучающих диодах на квантовых точках А.В.Беляков<sup>1</sup>, М.Ю.Перов, А.В.Якимов, Л.К.Дж.Фандамме<sup>\*2</sup>

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

<sup>\*</sup>Eindhoven University of Technology, 5600MB Eindhoven, The Netherlands

Приводится обзор результатов, полученных в эксперименте по измерению НЧ шумовых характеристик светоизлучающих диодов на InAs квантовых точках. Анализируются динамические и шумовые характеристики образцов, такие как параметр формы спектра, зависимости спектра флуктуаций тока и напряжения от тока через образец. Поведение образцов с точки зрения шумов сравнивается с поведением обычных диодов с p-n-переходом. Исследуется влияние взрывного шума на качество светодиодов.

## 1. Введение

Осенью 2002 года, в рамках программы НАТО "Наука для Мира", проведены совместные эксперименты Нижегородский госуниверситет – Эйндховенский технологический университет по исследованию НЧ шумов светоизлучающих диодов [1] на InAs квантовых точках (КТ). Здесь приводятся основные экспериментальные результаты, полученные при исследовании электрических шумов образцов.

### 2. Структуры и экспериментальная установка

Функциональная схема измерительной установки приведена на рис.1.



# Рис.1

НЧ флуктуации напряжения исследуемого диода усиливались, оцифровывались и записывались на жесткий диск компьютера реализациями по 1 млн. отсчетов. Затем данные обрабатывались при помощи многофункционального анализатора, выполненного в программной среде LabVIEW [2].

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Тел.: +7-8312-656153; Fax: +7-8312-656416; E-mail: belyakov@rf.unn.ru

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Тел.: +31.40.247 3242; Fax: +31.40.243 0712; E-mail: L.K.J.Vandamme@ele.tue.nl

Светоизлучающие диоды имели два типа гетероструктур (рис.2). Оба типа имеют слой InAs KT в p-n-переходе. Светодиоды, имеющие в своем названии индекс "K", относятся к структуре № 3486. Образцы без индекса "K" относятся к структуре №3504, которая отличается наличием дополнительного слоя InGaAs квантовых ям (КЯ).

Обе структуры имеют n<sup>+</sup>-GaAs подложку и n<sup>+</sup>-GaAs буферный слой, экспонированный в CCl<sub>4</sub>, с концентрацией основных носителей  $n=10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Слой n-GaAs является матрицей для наращивания квантовых точек. Активная область светодиодов, представленная слоем InAs KT, располагается в центре резкого p-n-перехода. Слой p<sup>+</sup>-GaAs также является буферным.

Отличием структуры №3504 является наличие слоя InGaAs КЯ толщиной 6 нм.



Рис.2

#### 3. Вольтамперные характеристики

Вольтамперная характеристика (ВАХ) полупроводникового диода I(V) и его дифференциальное сопротивление  $R_d$  имеют следующий вид:

$$I = I_0 \left( \exp\left(\frac{V - I \cdot R_S}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right), \ R_d = \frac{dV}{dI} = \frac{n \cdot V_T}{I + I_0} + R_S \approx \frac{n \cdot V_T}{I} \ . \tag{1}$$

Здесь n – коэффициент идеальности диода,  $V_T = k_B T/q$  – тепловой потенциал,  $I_0$  – ток насыщения диода,  $R_S$  – последовательное сопротивление образца.

Измерение ВАХ в эксперименте проводилось двумя способами: вручную, при помощи цифровых мультиметров, а также при помощи автоматизированной установки на базе LabVIEW. Следует отметить, что в большинстве случаев вольтамперные характеристики, измеренные обоими способами, совпадали, но для некоторых

образцов имели место небольшие различия, вероятно обусловленные нагреванием диода при ручном, более медленном, способе измерения.

На рис.3 представлена типичная вольтамперная характеристика (образец №2К) для диода со структурой №3486, не имеющей слоя КЯ.



Вольтамперные характеристики диодов, не имеющих в своей структуре КЯ, обладают коэффициентом идеальности  $n \approx 2$ . Это означает, что основной ток через диод вызван рекомбинацией носителей в области КТ, отвечающей за возникновение излучения. Время релаксации основных носителей заряда  $\tau = 10^{-9}$  с. Последовательное сопротивление диодов, проявляющееся на токах  $I_d \approx 0.9$  А, лежит в диапазоне  $R_S = 0.25 \div 1$  Ом.

У диодов, имеющих в своей структуре №3504 слой КЯ, был обнаружен более сложный характер ВАХ. На рис.4 представлен пример такой вольтамперной характеристики. Здесь можно выделить два участка с различными коэффициентами идеальности, оба из которых далеки от *n*=2. Следует отметить, что для некоторых диодов, имеющих КЯ в своей структуре, вообще не удалось осуществить шумовые измерения, ввиду крайней нестабильности работы диодов.

### 4. Спектральные характеристики

Для анализа свойств НЧ шума полупроводниковых светодиодов с КТ в активной области использована эмпирическая формула Хоухе для 1/*f* шума [3], впервые примененная к диоду на p-n-переходе Клайпеннином [4]:

$$\frac{S_I(f)}{I^2} = \frac{S_V(f)}{V^2} = \frac{q \cdot \alpha}{I \cdot \tau} \cdot \frac{1}{f} .$$
<sup>(2)</sup>

Здесь  $\alpha$  – параметр Хоухе, отображающий уровень 1/*f* шума образца в пересчете на один носитель тока, *I* – ток, *q* – заряд электрона,  $\tau$  – время релаксации неосновных носителей тока. Из выражения (2) следует, что спектр шумового тока на частоте *f* пропорционален току в образце: *S*<sub>I</sub>(*f*)  $\propto$  *I*.

Спектры флуктуаций напряжения и тока связаны через дифференциальное сопротивление образца:  $S_V(f) = (dV/dI)^2 \cdot S_I(f) = R_d^2 \cdot S_I(f)$ . Следовательно, в рамках модели Хоухе–Клайнпеннина, спектр шумового напряжения диода обратно пропорционален току:  $S_V(f) \propto 1/I$ .

На рис.5 представлено характерное семейство спектров  $S_V(I_d)$  для светодиодов без КЯ. Ток через образец изменялся от 100 мкА до 200 мА, при этом с ростом тока мощность шумов уменьшалась.



В семействе спектров нас интересуют параметр формы спектра  $\gamma$ , где  $S_V(f) \propto 1/f^{\gamma}$ , и зависимость величины спектров тока и напряжения на определенной частоте от тока через образец.

Параметр формы спектра варьируется около единицы, что говорит о наличии ярко выраженной фликкерной составляющей в шуме. Зависимость параметра формы спектра от тока через образец для диода №1К представлена на рис.6. Здесь параметр формы спектра рассчитывался в нескольких частотных диапазонах. Для относительно высокочастотной полосы 0,3 кГц < f < 3 кГц наблюдается некоторое уменьшение  $\gamma$  с ростом тока. Это может быть объяснено уменьшением фликкерного шума и появлением высокочастотного плато, обусловленного собственными шумами усилительной системы. Появление выбросов параметра формы спектра  $\gamma$ , рассчитанного в полосе от 10 Гц до 300 Гц, для больших значений тока  $I_d$  может быть объяснено проявлением дополнительного НЧ источника шума, например темпера-

турной нестационарности, когда температура образца начинает быстро возрастать с увеличением тока смещения.

Для обоих типов диодов, построенных на структурах №3504 и №3486, наблюдались значительные отклонения параметра формы  $\gamma$  от единицы (рис.7), которые, в частности, могут быть вызваны наличием телеграфной компоненты, соответствующей взрывному шуму. При наличии телеграфной компоненты параметр формы спектра принимает значения  $\gamma \approx 2$ . Для такого типа смешанных шумов требуется специальная цифровая обработка, основная идея и результаты которой будут кратко изложены далее.



Токовая зависимость спектра флуктуаций тока и напряжения диода №1К представлена на рис.8.



Видно, что для данного образца токовая зависимость спектра флуктуаций не подчиняется эмпирической зависимости Хоухе–Клайнпеннина, так как  $S_I \propto I^{1.8}$ . Если все же рассчитать постоянную Хоухе, то мы получим  $\alpha \approx 5 \cdot 10^{-4}$ . Резкий рост спектра флуктуаций напряжения на больших токах может быть вызван влиянием последовательного сопротивления диода.

Спектр флуктуаций тока для светодиода №2К ведет себя несколько иначе. Как видно из рис.9, при малых токах существует участок, где  $S_I \propto I_d$ , то есть формула Хоухе–Клайпеннина работает даже для такой сложной структуры, как светодиод с КТ в активной области. Это позволяет рассчитать постоянную Хоухе  $\alpha \approx 3 \cdot 10^{-4}$ . При превышении тока I = 1 мА характер зависимостей  $S_V$  и  $S_I$  меняется,  $S_I \propto I^{1.5}$ . Такая зависимость напоминает поведение шумов диода №1К во всем диапазоне исследуемых токов.

На рис.10а и 10б представлены токовые зависимости спектров флуктуаций напряжения и тока для светодиода №1 со структурой №3504.



Из рис.10а и 10б видно, что эмпирическая зависимость Хоухе–Клайнпеннина справедлива для данного образца только на участке средних токов от  $I \approx 0,1$  мА до  $I \approx 30$  мА. Постоянная Хоухе, определенная на этом участке, равна  $\alpha = 3 \cdot 10^{-4}$ .

Для диода №2 на структуре №3504 измерения выявили значительную нестабильность как динамических (ВАХ), так и шумовых характеристик.

### 5. Влияние взрывного шума

Обнаружено, что некоторые из диодов генерируют взрывной шум, который проявляется в виде телеграфной шумовой компоненты. В этом случае параметр формы спектра возрастает и принимает значение  $\gamma \approx 2$ , что соответствует лоренцевой форме спектра, которая в частном случае является формой спектра случайного телеграфного процесса (СТП).

На рис.11 изображен участок осциллограммы шума с ярко выраженным взрывным шумом (светодиод №4К). Шумовой процесс имеет два метастабильных со-

стояния, между которыми происходят случайные переключения. Примеры экспериментальных функций плотности вероятности (гистограмм) для токов смещения, равных  $I = 2,15 \cdot 10^{-6}$  A и  $I = 1,53 \cdot 10^{-4}$  A, представлены на рис. 12.

Предполагая, что гистограмма состоит из двух гауссовых распределений с различными средними значениями и, используя стандартную теорию обнаружения сигнала на шумовом фоне, мы разделяем взрывную и гауссову компоненты во временной области\*.



Разделив компоненты, можно исследовать спектры взрывного и гауссова шума отдельно. Характерные спектры исходного, гауссова и взрывного шумов представлены на рис.13.



Спектр одного из выделенных процессов имеет форму 1/f, другой – лоренцеву форму, которая соответствует СТП. Интересно, что используемый метод обнару-

<sup>\*</sup> См. также статью: А.В.Беляков, Л.К.Дж.Фандамме, М.Ю.Перов, А.В.Якимов. "Взрывной и 1/f шум в светоизлучающих диодах на квантовых точках". Настоящий сборник, с. 129.

живает вклад 1/f шума в частотном диапазоне 30 Гц < f < 3 кГц, который, по крайней мере, на порядок меньше исходного шума.

Токовая зависимость спектра флуктуаций тока и напряжения разделенных компонент шума светодиода №4К представлены на рис.14 и 15.



Для фликкерной (гауссовой) компоненты шума (рис.14) на частотах анализа f=10 Гц и f=100 Гц величина спектра  $S_I \propto I$ . Таким образом, эксперимент опять показывает, что такие сложные структуры, как светодиоды на КТ, с точки зрения шумов ведут себя схоже с обычными диодами. Используя соотношение Хоухе– Клайнпеннина, мы получаем параметр Хоухе для извлеченного 1/f шума  $\alpha = 8 \cdot 10^{-5}$ .

Спектральные характеристики взрывной компоненты исходного шума (рис.15) ведут себе несколько иначе, чем у фликкерной компоненты. Более того, они имеют излом при токе диода I = 100 мкА, что, в частности, свидетельствует о различном происхождении компонент исходного шума.

### 6. Выводы

- Исследованы светоизлучающие диоды на структурах №3504 и №3486, имеющих в своем составе слой InAs квантовых точек (КТ). Кроме КТ, структура №3504 имеет слой InGaAs квантовой ямы.
- 2) Динамические характеристики светодиодов различаются для структур №3504 и №3486. Все исследованные образцы, имеющие структуру №3486, имеют ВАХ с коэффициентом идеальности n≈2, то есть основной ток через диод вызван рекомбинацией носителей в области КТ, отвечающей за возникновение излучения. Для диодов со структурой №3504 ВАХ носит более сложный характер и имеет два участка с различными коэффициентами идеальности.
- Эмпирическая формула Хоухе–Клайнпеннина применима к светодиодам на КТ, только в некотором диапазоне токов, где исследованные образцы ведут себя так же, как и обычные диоды, и характеризуются постоянной Хоухе α ≈ 10<sup>-4</sup>.

- В шумах образцов обнаружены отклонения от 1/*f* шума, которые в некоторых случаях говорят о наличии взрывного шума, приводящего к нестабильной работе светодиода.
- 5) Использование метода обработки шума, основанного на стандартной теории обнаружения сигнала, позволило выделить взрывной шум и исследовать его отдельно. Обнаружено, что на фоне телеграфного шума действует 1/*f* шум, имеющий нормальное распределение. Постоянная Хоухе для выделенной фликкерной компоненты α ≈ 8·10<sup>-5</sup>.
- 6) Использованный шумовой анализ позволил выявить ненадежные приборы, а также общие слабые места образцов, такие как наличие дефектов, приводящих, в частности, к появлению телеграфной шумовой компоненты. Наличие взрывного шума говорит о недостаточно высокой технологии изготовления прибора. Улучшение технологии изготовления сделает возможным создание светодиодов высокого качества с хорошими техническими характеристиками, о чем свидетельствуют достаточно низкие значения постоянной Хоухе.

# Благодарности

Исследованные образцы изготовлены в Научно-исследовательском физикотехническом институте (Нижегородский госуниверситет, лаборатория Б.Н.Звонкова). Данное исследование и изготовление светодиодов проведено при частичной поддержке НАТО в рамках программы "Наука для Мира" SfP-973799 между университетами Нижнего Новгорода и Эйндховена (Нидерланды). Также эта работа была поддержана грантами РФФИ № 01–02–16666, № 02–02–06298 и "Ведущие научные школы" № НШ–1729.2003.2.

# Литература

 Байдусь Н.В., Бирюков А.А., Звонков Б.Н., Здоровейщев А.В., Мокеева П.Б., Некоркин С.М., Ускова Е.А. "Электролюминесценция p-n структур с квантовыми точками InAs/GaAs, выращенными методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений" //В кн.: Труды 2-го рабочего совещания по проекту НАТО SfP-973799 Полупроводники, Апрель 2002 г. /Ред. А.В.Якимов. –Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2002, с.93–99.
 N.V.Baidus, A.A.Birukov, B.N.Zvonkov, A.V.Zdoroveishev, S.M.Nekorkin, P.B.Mokeeva, and E.A.Uskova. "Electroluminescence of p-n InAs/GaAs quantum

dots heterostructures grown by MOVPE" //Proceedings of the NATO Project SfP-973799 Semiconductors 2nd Workshop, April 2002 /Ed. by A.V.Yakimov. – Nizhni Novgorod: TALAM–Press, 2002, p.93–99; <u>http://www.rf.unn.ru/NATO/index.html</u>.

[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 НАТО SfP-973799 Semiconductors. /Ред. А.В. Якимов. – Нижний Новгород: ТАЛАМ, 2002, с.38– 46.

- A.A.Andronov, A.V.Belyakov, V.A.Guryev, and A.V.Yakimov. "The interactive visual development of applications of **automation** scientific and industrial measuring

and control systems by means of LabVIEW 6i National Instruments" //Proceedings of the NATO Project SfP–973799 Semiconductors 2nd Workshop, April 2002 /Ed. by 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.Kleinpenning, 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] T.G.M.Kleinpenning. "1/F noise in p-n diodes" //Physica. 1980. V.98 B+C. P.289– 299.

# Low frequency noise in light – emitting diodes with quantum dots A.V.Belyakov<sup>1</sup>, M.Yu.Perov, A.V.Yakimov, L.K.J.Vandamme<sup>\*2</sup>

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

<sup>\*</sup>Eindhoven University of Technology, 5600MB Eindhoven, The Netherlands

Review of experimental results on low frequency noise measurements in light – emitting diodes with InAs quantum dots (QD) is presented. Both I-V and noise characteristics, such as the frequency exponent for the spectrum and dependences of current and voltage noise on biasing current, are analyzed. Behavior of QD diodes is compared with behavior of ordinary p-n-junction diodes from the noise point of view. Influence of burst noise is also studied.

### 1. Introduction

Joint experiments, Nizhni Novgorod State University – Eindhoven University of Technology, on low frequency noise measurements in light – emitting diodes (LED) with InAs quantum dots (QD) layer [1] were made in autumn of 2002. Some experimental results obtained are presented in this work.

### 2. Experimental setup and structures of samples

The functional scheme of measurement setup is shown in Fig.1.

Low frequency voltage fluctuations across biased sample were amplified, converted from analogous to digital form and written to the hard disk of PC as a binary file. This file was a data source for the multifunctional noise analyzer [2].

We had two types of LEDs with different structures (see Fig.2). Both types have InAs layer of QDs in p-n-junction. Light-emitting diodes having index "K" in their name belong to structure No. 3486. Samples without this index belong to structure No. 3504, which has an additional InGaAs layer of quantum wells (QW).

Both structures have  $n^+$ -GaAs substrate and  $n^+$ -GaAs buffer layer with concentration of carriers  $n=10^{18}$  cm<sup>-3</sup>. Layer n-GaAs is a matrix for QDs growing. An active region of LEDs is represented by InAs QD layer and placed in the middle of p-n–junction. Layer of  $p^+$ -GaAs is also buffer one.

In the difference, the structure No. 3504 has an additional InGaAs QW layer.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Phone: +7-8312-656153; Fax: +7-8312-656416; E-mail: belyakov@rf.unn.ru

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Phone: +31.40.247 3242; Fax: +31.40.243 0712; E-mail: L.K.J.Vandamme@ele.tue.nl

### 3. I-V characteristics

Semiconductor diode has I-V characteristic I(V) and differential resistance  $R_d$  as expressed by eq. (1). Here n – an ideality factor of a diode,  $V_T = k_B T/q$  –thermal potential,  $I_0$  – saturation current,  $R_s$  – series resistance.

I-V characteristic has been measured in two ways: "manually" with help of digital multimeters and "automatically" by the special setup on LabVIEW basis. In the most of cases I-V characteristics measured by both methods concur each other. But also there were difference in I-V characteristics for some diodes probably caused by the difference in heating of samples during slow "manual" and fast "automatic" method.

Typical I-V characteristic for diodes with structure No. 3486 is presented in Fig.3 (sample #2K). It was found that I-V characteristics for diodes without QWs have an ideality factor n=2. It means that the main current though the diode is due to recombination in the QDs region that causes the emitting of the light. Carrier recombination time is  $\tau=10^{-9}$  sec. Series resistance of diodes appears at current  $I\approx0.9$  A and has a value  $R_S=0.25\div1$  Ohm.

Diodes of structure No. 3504 with additional QW layer show more complicated behavior of I-V characteristic. An example of such I-V characteristic is presented in <u>Fig.4</u>. There are two regions with different ideality factors, which are not equal to n=2 as for diodes of structure No. 3486.

Note that for several diodes with QWs in their structures it became impossible to make noise measurements due to unstable behavior.

### 4. Spectral characteristics

We used Hooge's empirical relation (2) for 1/f noise [3] applied to diodes by T.G.M.Kleinpenning [4] for analysis of low frequency noise in LEDs with QDs in active region. Here  $\alpha$  – the Hooge's parameter showing level of 1/f noise per one carrier, I – current through the diode, q – elementary charge,  $\tau$  – carrier recombination time. From eq. (2) it follows that spectrum is proportional to the biasing current:  $S_I(f) \propto I$ .

Spectra of voltage and current noise are connected via differential resistance of the diode:  $S_V(f) = (dV/dI)^2 \cdot S_I(f) = R_d^2 \cdot S_I(f)$ . Thus, spectrum of voltage fluctuation is inversely proportional to the current:  $S_V(f) \propto 1/I$ .

The set of spectra  $S_V(I_d)$  measured at different currents through the LED without QW is shown in <u>Fig.5</u>. Current through the diode was changed from 100  $\mu$ A up to 200 mA with decreasing of noise power.

Here we are interested in a frequency exponent  $\gamma$ , where  $S_V(f) \propto 1/f^{\gamma}$ , and dependence of current and voltage spectra at fixed frequency on biasing current.

The dependence of frequency exponent on biasing current is presented in Fig.6 for LED #1K. This value varies near unity  $\gamma \approx 1$ . Here  $\gamma$  was calculated in several frequency bands. There is a decrease of  $\gamma$  with an increase of the current through the diode for the frequency band of 0.3 kHz < f < 3 kHz. It may be explained by the effect of decrease of 1/f noise and appearance of high frequency plateau caused by noise of the amplification system. Appearing of excursions at higher currents  $I_d$  for the factor  $\gamma$  that is calculated for

the band from 10 Hz up to 300 Hz can be explained by additional low frequency noise source. It could be, for example, temperature nonstationarity, when the temperature of the diode is increased very fast with bias current increase.

For both types of diode structures No. 3504 and No. 3486 strong deviation of the frequency exponent  $\gamma$  from unity has been found (see Fig.7). Some of these deviations are caused by burst noise represented by random telegraph noise component. In such a case  $\gamma \approx 2$  and spectrum has a Lorentzian shape. Advanced digital treatment described below was applied for such mixture noise.

Current dependence of voltage and current noise spectra for LED #1K are show in Fig.8. It is clear that Hooge–Kleinpenning empirical relation doesn't suit for this diode, since  $S_I \propto I^{1.8}$ . But if we culculate Hooge's parameter anyway we find  $\alpha \approx 5 \cdot 10^{-4}$ . Fast increasing of voltage noise spectrum at higher biasing current could be caused by the influence of diode seriese resistance.

A behavior of spectra for diode #2K is different (see Fig.9). There is a region at low current where  $S_I \propto I$ . It means that Hooge-Kleinpenning relation works even for such complicated structure as QD LEDs. Thus, we calculate Hooge's parameter  $\alpha \approx 3 \cdot 10^{-4}$ . The behavior of  $S_V$  and  $S_I$  changes at current I = 1 mA and become  $S_I \propto I^{1.5}$  that is similar to dependence for diode #1K in the whole region of investigated currents.

Current dependences of voltage and current noise for diode #1 with QWs in its structure are shown in Figs. <u>10a</u> and <u>10b</u>. It is seen that Hooge–Kleinpenning relation is aplicable only in the region of biase currents from  $I \approx 0.1$  mA to  $I \approx 30$  mA. Hooge's parameter  $\alpha = 3 \cdot 10^{-4}$  has been found here.

Diode #2 with structure (No.3504) appeared to be very unstable from both DC and AC points of view.

# 5. Influence of the burst noise

It was found that several samples produce burst noise appearing as random telegraph signal (RTS). In such a case  $\gamma=2$  and spectrum has a Lorentzian shape.

In Fig.11 a part of the waveform of raw noise obtained from LED #4K is depicted. Raw noise has two metastable states and random switching between them. Typical probability density functions (*pdf*) of raw noise for current  $I = 2.15 \cdot 10^{-6}$  A and  $I = 1.53 \cdot 10^{-4}$  A are depicted in Fig.12.

Assuming that raw *pdf* consists of two Gaussian distributions with different mean values and using the standard signal detection theory in a background noise we split burst and Gaussian components in the time domain<sup>4</sup>.

After splitting it is possible to study spectra of noise components. Typical spectra of raw, Gaussian and burst noise are presented in Fig.13. Spectrum of Gaussian component has 1/f shape; spectrum of burst noise has a Lorentzian shape. The surprising result is that the detection method shows a 1/f contribution in a frequency range of 30 Hz < f < 3 kHz at least one order of magnitude below the raw spectra.

<sup>\*</sup> See also: A.V.Belyakov, L.K.J.Vandamme, M.Yu.Perov, A.V.Yakimov. "The burst and 1/f noise in light-emitting quantum dot diodes". This issue, page 129.

Current dependences of voltage and current noise spectra of detached noise components for LED #4K are presented in Figs. 14 and 15.

Spectral values of 1/f component at frequencies f=10 Hz and f=100 Hz are proportional to diode current,  $S_I \propto I$ . Thus, experiment shows that such complicated structures as LEDs with QDs have similar behavior from the 1/f noise point of view as ordinary diodes. Using Hooge–Kleinpenning relation we obtain Hooge's parameter  $\alpha = 8 \cdot 10^{-5}$ .

Behavior of spectral characteristics of the burst noise (see Fig.15) differs from behavior of the 1/f component. Moreover these characteristics have a break at the diode current  $I_d = 100 \ \mu$ A. It means that detached components have different physical origin.

# 6. Conclusions

- 1) Diodes with structures No.3504 and No.3486 have been studied. These structures have IaAs QDs layer and structure No.3504 has an additional InGaAs QWs layer.
- 2) I-V characteristics of LEDs studied are different for structures No.3504 and No.3486. All samples with structure No.3486 show I-V characteristic with ideality factor n=2. It means that the main current though the diode is due to recombination in the QDs region that causes the emitting of the light. Diodes with structure No.3504 show more complicated I-V characteristic having two regions with different ideality factors.
- 3) Empirical Hooge–Kleinpenning relation is applicable to LEDs with QDs. Behavior of samples for some range of diode currents is the same as for ordinary diodes with Hooge's parameter  $\alpha \approx 10^{-4}$ .
- 4) Some diodes show deviations from 1/f noise. It is due to the burst noise that leads to unstable work of diode.
- 5) Using the standard signal detection theory in a background noise we detached the burst noise and studied it separately. It was found that another part of raw noise is Gaussian and has 1/f spectrum. Hooge's parameter for detached 1/f component is  $\alpha \approx 10^{-5}$ .
- 6) Noise analysis used allows us to find non-reliable diodes and its weak points such as existence of defects yielding the burst noise. Such burst noise shows that technology of manufacturing of diodes in not high enough. Improving of technological process will allow creating diodes of a good quality because Hooge's parameter for 1/f noise is rather low.

# Acknowledgements

LEDs for this investigation were manufactured in the Physical–Technical Research Institute (State University of Nizhni Novgorod, Laboratory by Dr. B.N.Zvonkov). This investigation and the manufacturing of LEDs were partly supported by the NATO's Scientific Affairs Division in the framework of the "Science for Peace" Project SfP–973799 between 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).