

Особенности фликкерного шума в квантово-размерных гетеронаноструктурах на основе GaAs

А.В. Ключев, А.В. Якимов, М.И. Рыжкин, А.П. Лучников, О.В. Болховская

Исследованы спектры фликкерного (1/f) шума светоизлучающих GaAs-диодов и лазеров, имеющих наноразмерную структуру на основе арсенида галлия и его твёрдых растворов разного состава. На основе анализа вольтамперных характеристик и токовых спектральных зависимостей шумов напряжения обнаружены токи утечки, оказавшиеся основными источниками шума в образцах.

Ключевые слова: фликкерный шум, лазеры, светоизлучающие диоды, квантовые ямы, квантовые точки, ток утечки.

Investigation of 1/f noise in quantum-dimensional heteronanostructures based on GaAs

A.V. Klyuev, A.V. Yakimov, M.I. Ryzhkin, A.P. Luchnikov, O.V. Bolkhovskaya

Results of 1/f noise spectrum investigation in light-emitting diodes and lasers with nanoscale structures, based on GaAs and alloys of different composition, are shown. Leakage current has been found from the analysis of current-voltage characteristics and voltage noise spectrum dependencies on the current. Leakage current is appeared to be the main source of noise in the studied devices.

Keywords: 1/f noise, laser, light-emitting diodes, quantum wells, quantum dots, leakage current.

Введение

В настоящее время полупроводниковые наноразмерные светоизлучающие приборы являются одной из активно развивающихся областей нанoeлектроники. Многообещающими приборами данного направления являются диоды и лазеры на самоорганизованных квантовых точках (КТ) и на квантовых ямах (КЯ). Предполагается, что такие диоды должны функционировать при более высоких температурах, иметь меньшую температурную чувствительность и обладать высокой радиационной стойкостью.

Фликкерный шум оказывает влияние на интенсивность оптического излучения полупроводниковых наноразмерных светоизлучающих приборов [1-3], а спектральные характеристики излучения лазерных диодов очень важны в некоторых приложениях. Этот факт делает важным исследование 1/f шума в лазерах. Несмотря на существование многих моделей фликкерного шума, природа его остаётся неясной [4-6].

Проведены эксперименты по исследованию низкочастотных (НЧ) шумов следующих наноразмерных полупроводниковых структур:

1) светоизлучающих диодов на InAs квантовых точках,

2) светоизлучающих диодов на InAs квантовых точках с дополнительной $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ квантовой ямой,

3) $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}/\text{GaAs}/\text{InGaP}$ лазеров на квантовых ямах.

Структуры изготовлены в лаборатории Б.Н. Звонкова, в Нижегородском физико-техническом институте (НИФТИ) при ННГУ.

Основными целями настоящей работы являются экспериментальные и теоретические исследования механизмов шумообразования и локализация источников шума в полупроводниковых светоизлучающих структурах.

Ниже приведены результаты исследования НЧ шумов светоизлучающих приборов (токовые зависимости спектров шумов), а также технические параметры (вольтамперные характеристики (ВАХ), ток насыщения, последовательное и параллельное паразитные сопротивления). В настоящей работе на основе анализа ВАХ и токовых спектральных зависимостей шумов напряжения в наноразмерных лазерах и светодиодах обнаружены шумы токов утечки, оказавшиеся основным источником фликкерного шума в образцах.

Структура приборов и методы исследования

Структура лазеров на КЯ, светоизлучающих диодов и их эквивалентные схемы изображены на рис. 1.

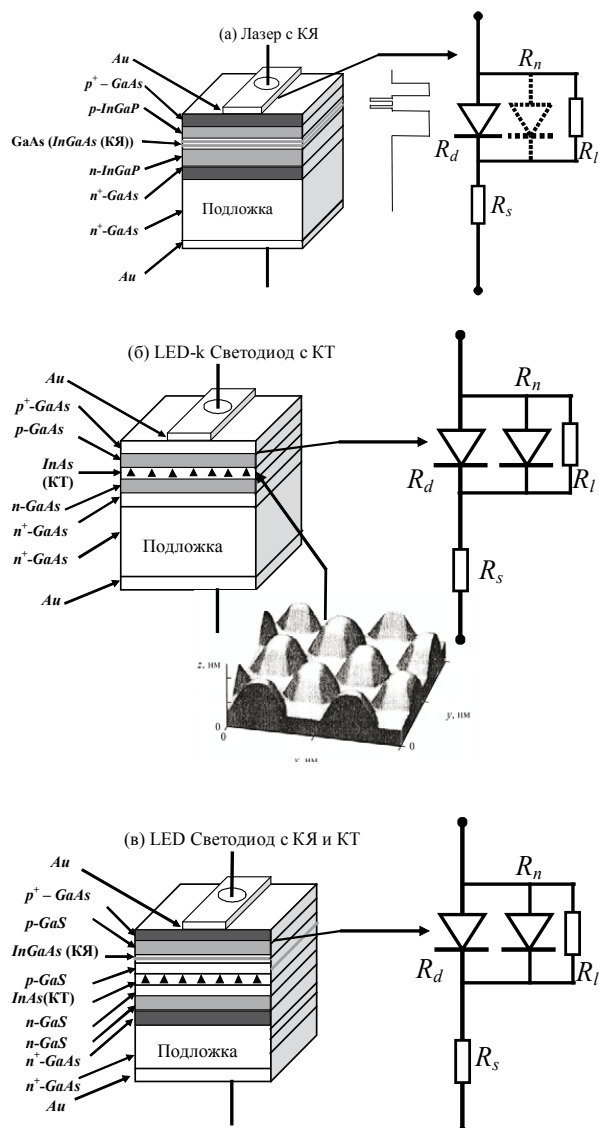


Рис. 1

Структурные схемы исследованных гетеронаноструктур на основе GaAs и их эквивалентные схемы

Теоретическое выражение предполагаемой ВАХ $p-n$ перехода и соответствующее дифференциальное сопротивление R_d имеют вид [3, 7]:

$$I_d = I_s \cdot [\exp(V/(\eta_d V_T)) - 1],$$

$$R_d = (dI_d/dV)^{-1} = \eta_d V_T / (I_d + I_s). \quad (1)$$

Здесь V – напряжение на переходе, I_s – ток насыщения, V_T – тепловой потенциал. Коэффициент неидеальности вольтамперной характеристики (ВАХ) исследуемых структур равен $\eta_d = 2$ [2, 3]. Часто диоды обладают нежелательными или паразитными сопротивлениями (последовательными или параллельными), которые приводят к отклонению реальных ВАХ диодов от идеальных. Последовательные сопротивления могут появляться из-за слишком большого сопротивления контактов или из-за сопротивления нейтральной области. Любые каналы в $p-n$ переходе, вызванные разрушениями его областей или дефектами на поверхности, приводят к формированию паразитных параллельных сопротивлений.

Наличие последовательного сопротивления R_s (см. рис. 1) ведёт к отклонению ВАХ светодиода от идеальной экспоненты в области больших значений прямого тока. В соответствии с правилом Кирхгофа значения напряжений на диоде и на сопротивлении складываются.

ВАХ сопротивления является линейной при построении на графике с линейными шкалами и логарифмической при построении в полулогарифмическом масштабе.

В случае параллельного паразитного сопротивления R_i (см. рис. 1), в соответствии с правилом Кирхгофа, токи через диод и сопротивление складываются. Форма искривления характеристики при прямом смещении диода, наблюдаемая на графике в полулогарифмическом масштабе, приблизительно совпадает с обратным током насыщения [7]. Именно по этой особенности можно распознать наличие паразитного параллельного сопротивления. Для удобства паразитное параллельное сопротивление R_i (шунт) будем называть линейной утечкой. Ток линейной утечки имеет вид:

$$I_l = V/R_i \quad (2)$$

Наличие паразитных параллельного и последовательного сопротивлений приводит к искажениям ВАХ светодиода, как при малых, так и при больших токах [7].

Для диодов с параллельным паразитным $p-n$ переходом меньшей площади и с меньшей высотой потенциального барьера, чем основной переход, характерно

преждевременное включение, объясняемое утечками либо через поверхностные состояния по периметру кристалла, либо внутренними дефектами, создающими внутри структуры паразитные $p-n$ переходы с меньшей, чем у основного диода, высотой потенциального барьера [7].

В этом случае искривление формы ВАХ светодиода на графике в полулогарифмическом масштабе наблюдается при гораздо больших токах прямого смещения, чем уровень обратного тока насыщения. Это и есть основное отличие от случая диода с паразитным параллельным сопротивлением. Параллельный паразитный $p-n$ переход с меньшей высотой потенциального барьера будем называть нелинейной утечкой. ВАХ и соответствующее дифференциальное сопротивление R_n параллельного паразитного $p-n$ перехода имеют вид [2, 3, 8-13]:

$$I_n = I_{n0} \cdot [\exp(V/\eta_n V_T) - 1],$$

$$R_n = (dI_n/dV)^{-1} = \eta_n V_T / (I_n + I_{n0}). \quad (3)$$

Здесь I_{n0} – характерный ток; η_n – коэффициент неидеальности нелинейной утечки.

Все эквивалентные резисторы, изображённые на эквивалентных схемах на рис. 1, могут быть подвержены флуктуациям:

$$R_\lambda = (1 + \delta R_\lambda(t)) \cdot \langle R_\lambda \rangle, \quad \lambda = d, l, n, s. \quad (4)$$

Здесь $\langle R_\lambda \rangle$ – невозмущённое значение, а $\delta R_\lambda(t)$ – относительные флуктуации соответствующего дифференциального сопротивления. $1/f$ шум эквивалентных резисторов может быть обусловлен подвижными дефектами [3, 14], которые проявляются как стохастическая перестройка атомной структуры различных областей диода.

Введённые флуктуации можно считать некоррелированными, поскольку они отражают пространственно разнесённые процессы. Согласно модели бистабильных дефектов [3, 15, 16], спектры относительных флуктуаций сопротивлений не зависят от величины тока через диод [17]:

$$S_{\delta R_\lambda}(f) = \text{const}(I), \quad \lambda = d, l, n, s. \quad (5)$$

Спектр $S_v(f)$ полного $1/f$ шума напряжения определяется спектрами $S_{\delta R_\lambda}(f)$ и относительными вкладами различных компонент в полный ток I .

Эффект максимизации шума обусловлен флуктуациями сопротивления утечки $\delta R_\lambda(t)$. Детальный экспериментальный и теоретический анализ этого эффекта выполнен в [3, 18-20]. В этом случае рассматриваются основная компонента тока и ток утечки, который является источником $1/f$ шума. Флуктуации тока утечки, описываемые источником $\delta R_l(t)$, эквивалентны возникновению генератора шумового тока $i_l(t) = \delta R_l(t)I_l$, включённого параллельно с дифференциальным сопротивлением диода R_d и сопротивлением тока утечки R_l . Шумовое напряжение, выделяющееся на параллельно включённых резисторах R_d и R_l , равно $v(t) = (R_d^{-1} + R_l^{-1})^{-1} i_l(t)$. Токовая зависимость спектра шума в этом случае имеет максимум. Если утечка достаточно слаба и линейна, то максимум наблюдается при напряжении на диоде, равном тепловому потенциалу $V = V_T$. При этом в области малых токов спектр нарастает пропорционально квадрату тока $S_v \sim I^2$ так же, как это наблюдается для $1/f$ шума линейного резистора. В области больших токов, когда рост напряжения на $p-n$ переходе происходит логарифмически медленно $V \sim \ln I$, нарастание $1/f$ шума тока утечки $i_l(t)$ также происходит логарифмически медленно. Но при этом сопротивление диода уменьшается достаточно быстро – $R_d \sim I^{-1}$. Таким образом, в области больших токов спектр убывает примерно пропорционально квадрату тока. В случае нелинейной утечки эффект максимизации шума сохранится, но будет проявляться слабее из-за уширения максимума [18].

Экспериментальная установка

В эксперименте измерялось шумовое напряжение лазеров и светодиодов (рис. 2). НЧ шум флуктуаций напряжения усиливался, оцифровывался, записывался на жёсткий диск компьютера реализациями по 10^6 отсчётов. Затем осуществлялась обработка данных при помощи многофункционального анализатора, выполненного в программной среде LabVIEW [22].

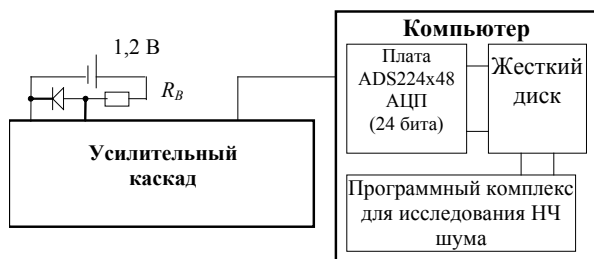


Рис. 2

Блок-схема измерительной установки

Низкочастотный шум в светодиодах и лазерах

В данном разделе представлены результаты исследования ВАХ и $1/f$ шумов светодиодов и лазеров, работающих в режиме спонтанного излучения. Выполнен совместный анализ вольтамперных характеристик и токовых зависимостей спектров электрических шумов рассматриваемых образцов.

ВАХ всех образцов содержит рекомбинационную компоненту, обусловленную током через КЯ (КТ) и имеющую коэффициент неидеальности $\eta_d = 2$. Все образцы обладают примерно одинаковым сопротивлением базы. Главное различие заключается в характере и величине тока утечки.

На рис. 3 приведены ВАХ лазеров 1 и 15. Точками показаны экспериментальные данные. Сплошная линия – результат аппроксимации, полученный путём учёта рекомбинационной компоненты тока, тока линейной и нелинейной утечки и сопротивления базы.

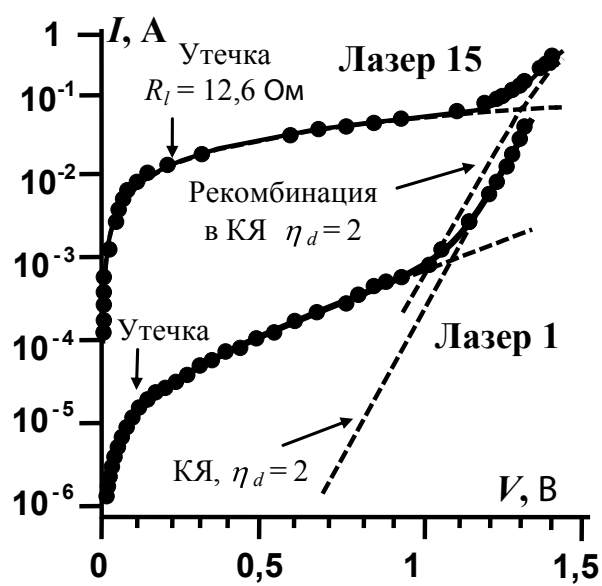


Рис. 3

ВАХ лазеров на КЯ

Обратимся сначала к анализу ВАХ лазера 15. На рис. 3 представлено разложение ВАХ лазера 15 на две компоненты: рекомбинационный ток и ток утечки. Этот лазер отличается сильной линейной утечкой, характеризующейся сопротивлением $R_l = 12,6$ Ом, сопротивление базы составляет $R_b = 0,1$ Ом, а характерный ток рекомбинационной компоненты равен $I_s = 9 \cdot 10^{-13}$ А.

Пунктирными линиями на рис. 3 показаны рекомбинационная компонента тока через образец I_s и ток линейной утечки I_l . Как видно, суммарный ток удовлетворительно описывает экспериментальные данные. Из-за небольшого значения сопротивления утечки, равного $12,6$ Ом, большая часть ВАХ описывается током утечки, и лишь в области относительно высоких напряжений ($V > 1,3$ В) можно наблюдать рекомбинационную компоненту тока.

Рассмотрим лазер 1, у которого утечка на 2 порядка меньше, чем у лазера 15 (рис. 3), и который имеет нелинейную экспоненциальную составляющую. На этом же рисунке показано разложение экспериментальной ВАХ лазера 1 на рекомбинационную токовую компоненту и компоненту нелинейной утечки с параметрами: $I_{n0} = 2,1 \cdot 10^{-5}$ А – характерный ток утечки, $\eta = 10,5$ – коэффициент неидеальности. Сопротивление базы оценивается как $R_b = 0,1$ Ом. Параметры рекомбинационной компоненты тока опять практически те же. Коэффициент неидеальности близок к двум $\eta_d \approx 2$, что свидетельствует о полной рекомбинации носителей тока в области КЯ. Характерный ток рекомбинационной компоненты равен $I_s = 6,5 \cdot 10^{-13}$ А. Суммарный ток, учитывающий нелинейную утечку и рекомбинационную компоненту, удовлетворительно согласуется с экспериментальной ВАХ.

Экспериментальные данные для спектров шумового напряжения (на частоте $f = 100$ Гц) лазеров 1 и 15 в зависимости от полного тока I через образец показаны точками на рис. 4. Эти данные могут быть объяснены с помощью модели шума тока утечки. Сплошные линии на рис. 4 соответствуют токовым зависимостям спектров $1/f$ шума, полученным из этой модели.

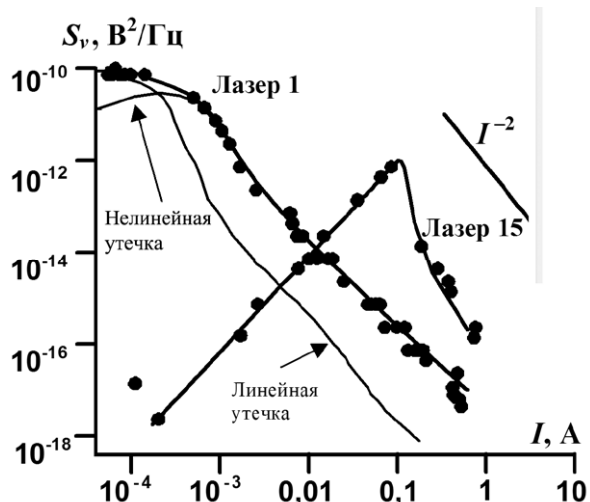


Рис. 4

Токовые зависимости спектров шума для лазеров на КЯ

Из рис. 4 видно, что для лазера 15 модель удовлетворительно описывает экспериментальные данные. В области малых токов преобладает ток утечки, о чём свидетельствует квадратичная зависимость спектра шумов напряжения. При больших токах ($I > 100$ мА) в светодиодном режиме, где проявляется рекомбинационная компонента, уровень шума резко спадает. В области стимулированного лазерного излучения ($I > 300$ мА) наблюдается некоторое расхождение экспериментальных данных с данными модели шума тока утечки.

Из аппроксимации спектра с помощью модели шума тока утечки следует, что спектр относительных флуктуаций сопротивления линейной утечки равен $S_{\delta R_l}(100 \text{ Гц}) = 10^{-12} \text{ Гц}^{-1}$. Следует отметить, что после достижения некоторого максимума, спектр спадает быстрее, чем это ожидалось на основании эффекта максимизации шума, описанного в предыдущем разделе. Это объясняется тем, что в нашем случае присутствует сильный ток утечки, а описанный закон убывания спектра шума пропорционально квадрату тока справедлив только для малых токов утечки.

Экспериментальные данные для спектра шума на частоте 100 Гц в зависимости от тока I для лазера 1 показаны точками на том же рис. 4.

Как видно, модель шума тока нелинейной утечки (показана на рис. 4 пунктиром) удовлетворительно описывает спектр шума напряжения лазера 1 в области больших токов, в то время как в области малых токов наблюдаются существенные различия между моделью и экспериментом. Это приводит к необходимости учёта шума линейной компоненты тока утечки.

Объединение моделей шума линейной и нелинейной утечек можно осуществить, представив сопротивление утечки в виде двух параллельных резисторов, один из которых является нелинейным (см. рис. 1). Линейная компонента тока утечки практически не заметна на ВАХ по сравнению с нелинейной компонентой, однако спектр шума тока утечки на малых токах определяется именно линейной компонентой. Если линейная утечка и существует для данного образца, то она может быть описана сопротивлением не меньше, чем 100 кОм.

На рис. 4 сплошной линией представлен спектр шума, полученный из объединённой модели шума линейной и нелинейной утечки. Видно, что модель и экспериментальные данные согласуются друг с другом. При этом параметры аппроксимации принимают следующие значения: линейное сопротивление утечки $R_l = 100$ кОм, характерный ток нелинейной утечки $I_{n0} = 2,1 \cdot 10^{-5}$ А, эффективный коэффициент неидеальности нелинейной утечки $\eta_n = 10,5$, спектр относительных флуктуаций линейного сопротивления утечки $S_{\delta R_l}(100 \text{ Гц}) = 9 \cdot 10^{-7} \text{ 1/Гц}$, спектр относительных флуктуаций нелинейного сопротивления утечки $S_{\delta R_n}(100 \text{ Гц}) = 4 \cdot 10^{-10} \text{ 1/Гц}$.

Как и для лазера 15, модель $1/f$ шума тока утечки удовлетворительно описывает экспериментальные данные. Следует отметить, что линейная компонента тока утечки в ВАХ практически не видна, однако она проявляется в токовой зависимости спектра шума.

Резюмируя анализ ВАХ и токовых зависимостей спектра шума лазеров, можно утверждать, что в лазерах 1 и 15 основным источником $1/f$ шума является ток утечки. Причём у лазера 15 утечка носит исключительно линейный характер, а у лазера 1 – сложный нелинейный характер.

Различия в характеристиках лазеров 1 и 15 (например, сопротивление утечки и спектр его относительных флуктуаций) свидетельствуют о том, что образцы, изготовленные по одной и той же технологии и имеющие одинаковую структуру, обладают различными свойствами, особенности которых могут быть выявлены при помощи шумового анализа.

Отметим, что при работе лазеров в темновом режиме и в режиме спонтанного излучения флуктуации электрических параметров, квантовых ям обнаружено не было.

В этом разделе были представлены результаты измерения шумов и ВАХ только некоторых из исследованных приборов. Однако подобному анализу подвергались образцы всех трёх типов, то есть лазеров на КЯ, светодиодов на КЯ и светодиодов на КЯ и КТ. В таблице 1 представлены результаты всех исследованных образцов.

ВАХ диодов со структурой, не имеющей слоя КЯ, обладают коэффициентом неидеальности $\eta_d \approx 2$. Это означает, что основной ток через диод вызван рекомбинацией носителей в области КТ, отвечающей за возникновение излучения. У диодов, имеющих в своей структуре слой КЯ, был обнаружен более сложный характер ВАХ.

Для светодиодов, так же, как и для лазеров, линейная компонента тока утечки практически не заметна в ВАХ по сравнению с нелинейной компонентой, однако спектр шума утечки на малых токах определяется именно линейной компонентой.

Флуктуации оптического излучения лазеров и анализ корреляции между $1/f$ электрическим шумом и флуктуациями интенсивности спонтанного излучения исследовались в работах [23-25] и здесь не обсуждаются.

Выводы

В результате проведённого исследования получены следующие основные результаты.

На основе анализа ВАХ и токовых зависимостей спектров шумов напряжения в наноразмерных лазерах и светодиодах обнаружен $1/f$ шум тока утечки, оказавшийся основным источником шума в образцах.

У некоторых лазеров на КЯ и светодиодов на КЯ и КТ линейная компонента тока утечки практически не заметна в ВАХ по сравнению с нелинейной компонентой, однако спектр $1/f$ шума тока утечки на малых токах определяется именно линейной компонентой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания

Таблица 1

Параметры исследованных структур

Лазеры							
№	I_{n0}, A	η_n	$R_l, k\Omega$	R_b, Ω	I_s, A	$S_{\delta RI}$	S_{δ}
1	$2,1 \cdot 10^{-5}$	10,5	100	0,1	$6,5 \cdot 10^{-13}$	$9 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-10}$
15	—	—	0,01	0,1	$9 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-12}$	—
8	—	—	6,03	0,07	$5 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-8}$	—
7F	$1 \cdot 10^{-11}$	3,56	50000	0	$2 \cdot 10^{-15}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-11}$
11	$6 \cdot 10^{-7}$	5,04	0,54	0,1	$4 \cdot 10^{-13}$	$9 \cdot 10^{-11}$	$4 \cdot 10^{-13}$
Светодиоды							
№	I_{n0}, A	η_n	$R_l, k\Omega$	R_b, Ω	I_s, A	$S_{\delta RI}$	S_{δ}
1	$1,3 \cdot 10^{-5}$	4,9	5,1	0,3	$2,8 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-11}$
1k	$1 \cdot 10^{-8}$	2,7	70	0,13	$2 \cdot 10^{-9}$	$4,5 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{-12}$
2k	$1,7 \cdot 10^{-11}$	3	10000	0,1	$1,7 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$
4k	$1,7 \cdot 10^{-10}$	3,5	500	0,1	$3 \cdot 10^{-9}$	$9 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-6}$

образовательным организациям высшего образования, подведомственным Минобрнауки России, в сфере научной деятельности, «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований и экспериментальных разработок)», код проекта 2183.

Литература

1. Ohtsu M. and Kotajima S. Derivation of the spectral width of a 0,8 μm AlGaAs laser considering 1/f noise // *Japan. J. Appl. Phys.* – 1984. – V. 23. – P. 760-764.

2. Беляков А. В. Проявление 1/f шума тока утечки в наноразмерных светоизлучающих структурах // А. В. Беляков, А. В. Клюев, А. В. Якимов // *Известия ВУЗов. Радиофизика.* – 2008. – Т. 51. – № 2. – С. 149-161.

3. Клюев А. В. Низкочастотные шумы в наноразмерных полупроводниковых структурах: источники, измерение, методы анализа. LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2011. – 208 с.

4. Bezrukov S. M., Vandamme L. K. J., and Kish L. B., Special Section on 1/f Noise: A Preface, *Fluctuation and Noise Letters.* – 2011. – V. 10 (4). – P. 417-418.

5. Клюев А. В. Детектирование случайного процесса с использованием диода Шоттки с δ -легированием // *Радиотехника и электроника.* – 2013. – Т. 58. – № 2. – С. 199-206.

6. Klyuev A. V. Cumulant analysis of Detection of random process Using a Schottky Diode with δ -Doping // *International Journal of Modern Physics B.* – 2013. – V. 27. – № 13. – P. 1350049 (12 pages) DOI: 10.1142/S0217979213500495.

7. Шуберт Ф.Е. Светодиоды / пер. с английского под ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.

8. Belyakov A.V., Klyuev A.V., Yakimov A.V. 1/f Noise In Leakage Current Of Nanoscale Light Emitting Structures // 19th international conference on Noise and Fluctuations (ICNF-2007), edited by M. Tacano, Yo. Yamamoto, M. Nakao, AIP Conference Proceedings.–Japan, Tokyo.–2007.–V. 922.–P. 329-332.

9. Klyuev A. V., Shmelev E. I., Yakimov A. V. Modification of Van der Ziel relation for spectrum of noise in p-n junction // *Fluctuation and Noise Letters.* – 2012. – V. 11. – № 2. – P. 1250015 (11 pages).

10. Беляков А.В. Исследование низкочастотных шумов наноразмерных InGaAs/GaAs/InGaP лазеров на квантовых ямах с целью диагностики их физических свойств / А.В. Беляков, А.В. Клюев, А.В. Якимов // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC-2005», 22-26 ноября 2005 г., Москва.* – М.: МИРЭА, 2005. – Часть 1. – С. 205-207.

11. Беляков А. В. Низкочастотный шум тока утечки в наноразмерных светодиодах на основе GaAs / А. В. Беляков, А. В. Клюев, А. В. Якимов // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC-2006», 24-28 октября 2006 г., Москва.* – М.: МИРЭА, 2006. – Часть 3. – С. 160-163.

12. Клюев А. В. Источники низкочастотных шумов в наноразмерных светоизлучающих структурах на основе GaAs // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC-2013», 2-6 декабря 2013 г., Москва.* – М.: МИРЭА, 2013. – Часть 1. – С. 124-127.

13. Клюев А. В. Источники фликкерного шума в полупроводниковых наноразмерных светоизлучающих структурах на основе GaAs и его твердых растворов // *Наноматериалы и наноструктуры -XXI век.* – 2014. – № 1. – С. 42-48.

14. Shmelev E.I., Klyuev A.V., Yakimov A.V. Complexes of spatially multistable defects as the source of 1/f noise in GaAs devices // *Fluctuation and Noise Letters.* – 2013. – V. 12. – №. 1 – P. 1350008 (13 pages). DOI: 10.1142/S0219477513500089.

15. Коган Ш. М. Шум в туннельных переходах, вызываемый двухуровневыми системами в диэлектрической прослойке / Ш. М. Коган, К. Э. Нагаев // *Письма в ЖТФ.* – 1984. – Т. 10. – № 5. – С. 313-316.

16. Kogan Sh. *Electronic Noise and Fluctuations in Solids,* Cambridge University Press. 2008.

17. Малахов А.Н. Флуктуации сопротивления полупроводниковых детекторов // *Радиотехника и электроника.* – 1958. – Т. 3. – № 4. – С. 547-551.

18. Klyuev A. V., Shmelev E. I., Yakimov A. V. Physical origins of 1/f noise in Si delta-doped Schottky diodes // *Fluctuation and Noise Letters.* 2014.–V. 13.–No. 1.–P.1450003 (16pages), WorldScientificPublishing Company DOI: 10.1142/S0219477514500035.

19. Wall E.L. Edge injection currents and their effects on 1/f noise in planar Schottky diodes // *Solid-State Electronics.* – 1976. – V. 19. – № 5. – P. 389-396.

20. Головкин А. Г. 1/f-шумы в барьерных слоях // *Изв. ВУЗов. Радиофизика.* – 1978.

21. Климов А. Э. Избыточные шумы в диодах на основе Pb1-xSnxTe и их связь с вольтамперными характеристиками / А. Э. Климов, И. Г. Неизвестный, В. Н. Шумской // *ФТП.* – 1983. – № 10. – Т. 17. – С. 1766-1770.

22. Шмелев Е. И. Мобильная установка для исследования низкочастотных шумов / Е. И. Шмелев, А. В. Клюев, А. В. Якимов // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского.* – 2009. – № 5. – С. 81-85.

23. Беляков А. В. Влияние фликкерного шума тока утечки на флуктуации интенсивности излучения лазеров на квантовых ямах / А. В. Беляков, А. В. Клюев, А. В. Якимов // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиофизика.* – 2005. – Вып. 1 (3). – С. 3-12.

24. Беляков А. В. 1/f шум тока утечки в наноразмерных полупроводниковых структурах и его влияние на флуктуации интенсивности излучения / А. В. Беляков, А. В. Клюев, А. В. Якимов // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC-2007», 23-27 октября 2007 г., Москва.* – М.: МИРЭА, 2007. – Часть 1. – С. 217-220.

25. Klyuev A. V., Yakimov A. V. 1/f noise in GaAs nanoscale light-emitting structures // *Physica B.* – 2014. – V. 440. – P. 145-151, <http://dx.doi.org/10.1016/j.physb.2014.01.021>.