

УДК 539.211

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУР InAs/GaAs С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ ПО ИНФОРМАЦИОННО-КОРРЕЛЯЦИОННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

© 2021 г. Н. В. Рыбина^{а, *}, А. В. Здоровейцев^{б,} Н. Б. Рыбин^{а, **}

^аРязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, 390005 Россия

^бНаучно-исследовательский институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 603950 Россия

*e-mail: pgnv@mail.ru

**e-mail: nikolay.rybin@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.04.2020 г.

После доработки 11.07.2020 г.

Принята к публикации 14.07.2020 г.

Представлена методика расчета информационно-корреляционных характеристик, базирующаяся на методах средней взаимной информации и двухмерного флуктуационного анализа с исключенным трендом. Экспериментальными образцами являлись структуры с массивом самоорганизованных квантовых точек InAs/GaAs, выращенном без покровного слоя методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений. Микроструктура поверхности образцов была исследована методом растровой электронной микроскопии. Получены информационно-корреляционные характеристики структур InAs/GaAs с квантовыми точками методами двумерного флуктуационного анализа с исключенным трендом и средней взаимной информации. Оценена упорядоченность массива квантовых точек в структуре InAs/GaAs в зависимости от применяемых технологических режимов изготовления. Выявлено, что повышение температуры выращивания экспериментальных образцов от 480 до 520°C повышает упорядоченность расположения квантовых точек на поверхности.

Ключевые слова: метод двумерного флуктуационного анализа с исключенным трендом, метод средней взаимной информации, информационно-корреляционные характеристики, упорядоченность, поверхность, структура InAs/GaAs с квантовыми точками, непрерывное вейвлет-преобразование, корреляционный вектор.

DOI: 10.31857/S1028096021040130

ВВЕДЕНИЕ

Использование массивов самоорганизованных квантовых точек (КТ) в электронных приборах получило широкое распространение. Важной технологической задачей является получение контролируемого монодисперсного массива КТ [1] с однородными размерами и формой. Это обуславливает проведение исследований их латерального упорядочения, как правило, с использованием статистического анализа топографических особенностей КТ [2, 3].

Структуры с КТ на основе InAs/GaAs представляют интерес с точки зрения получения оптического излучения в широком диапазоне длин волн (от 1 до 1.8 мкм). Длина волны света, излучаемого такими структурами, определяется взаимным расположением уровней размерного квантования для электронов и дырок в КТ, которое, в свою очередь, зависит от размеров КТ. Ширина линии излучения в таких структурах связана с однородностью распределения размеров КТ.

Цель данной работы — оценить упорядоченность массива КТ в структуре InAs/GaAs в зависимости от применяемых технологических режимов изготовления.

Оценка упорядоченности массива КТ в структуре InAs/GaAs проводилась с помощью методов средней взаимной информации (СВИ) и двухмерного флуктуационного анализа с исключенным трендом (2D detrended fluctuation analysis, 2D DFA) [4–8]. В работе [9] проводилось подобное исследование на модельных поверхностях.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИНФОРМАЦИОННО-КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Суть работы метода 2D DFA заключается в следующем.

1. Имеется изображение поверхности, представленное матрицей высот $H(i, j)$, где $i = 1, 2 \dots M$,

и $j = 1, 2 \dots N$. Вычисляется кумулятивная поверхность $Y(i, j)$:

$$Y(i, j) = \sum_{n=1}^i \sum_{m=1}^j H(i, j). \quad (1)$$

2. Кумулятивная поверхность разбивается на $M_s \times N_s$ не пересекающихся квадратных сегментов размером $s \times s$, причем $M_s = M/s$ и $N_s = N/s$. В каждом сегменте формируется поверхность вида $Y_{u, w}(i, j) = Y(l_1 + i, l_2 + j)$, для $1 \leq i, j \leq s$, где $l_1 = (u - 1)s$ и $l_2 = (w - 1)s$, где u, w – номера сегментов.

3. В каждой поверхности $Y_{u, w}(i, j)$ вдоль всех профилей по любой из осей вычисляется полиномиальная функция тренда первого порядка вида:

$$\tilde{Y}_{u, w}(i, j) = ai + b \quad (2)$$

или

$$\tilde{Y}_{u, w}(i, j) = aj + b. \quad (3)$$

4. Вычисляется функция остатка:

$$\epsilon_{u, w}(i, j) = Y_{u, w}(i, j) - \tilde{Y}_{u, w}(i, j). \quad (4)$$

5. Вычисляется локальная среднеквадратическая флуктуационная функция, имея в виду, что $\langle \epsilon_{u, w}(i, j) \rangle = 0$:

$$F(s, u, w) = \sqrt{\frac{1}{s^2} \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s \epsilon_{u, w}(i, j)^2}. \quad (5)$$

6. Вычисляется полная среднеквадратическая флуктуационная функция путем усреднения всех значений (5):

$$F(s) = \frac{1}{M_s N_s} \sum_{u=1}^{M_s} \sum_{w=1}^{N_s} F(s, u, w). \quad (6)$$

7. Далее изменяется масштаб s в диапазоне $s_{\min} \approx 4$ до $s_{\max} \approx \min(M, N)$ и вычисляется $F(s)$, причем для широких диапазонов значений s справедлива следующая зависимость $F(s) \sim s^\alpha$. Поэтому график $F(s)$ обычно строится в двойном логарифмическом масштабе. Из него можно определить следующие характеристики:

1) скейлинговый показатель α – тангенс угла наклона $F(s)$ до первого перегиба (характеризует тип корреляций в структуре);

2) корреляционный вектор d – пространственный масштаб, на котором наблюдается перегиб функции $F(s)$ (соответствует периоду гармонических составляющих в структуре).

С помощью метода СВИ можно также получить информацию о корреляциях в структуре

Таблица 1. Технологические параметры получения образцов с КТ InAs/GaAs

Параметр		№ образца		
		1	2	3
Температура выращивания КТ, °С		480	480	520
Потоки через регуляторы расхода газов (см ³ /мин)	AsH ₃	225	225	225
	Ga(CH ₃) ₃	450	450	450
	In(CH ₃) ₃	54	72	72

между произвольной парой точек A и B ($\forall A(x_1, y_1), B(x_2, y_2) \in DI(A, B)$):

$$I(A, B) = \iint_Z p_{AB}(z_1, z_2) \log_2 \left[\frac{p_{AB}(z_1, z_2)}{p_A(z_1) p_B(z_2)} \right] dz, \quad (7)$$

где z – случайная величина, которая характеризует высоту профиля поверхности материала в точке с координатами (x, y) ; D – область определения случайной величины z (плоскость образца); Z – область значений случайной величины z (высоты профиля точек поверхности); $p_A(z_1), p_B(z_2)$ – вероятности того, что случайная величина, отвечающая высоте профиля, принимает в точках A и B значение z_1 и z_2 ; $p_{AB}(z_1, z_2)$ – совместная вероятность одновременного принятия заданных значений в двух точках.

Метод СВИ позволяет получить распределение ВИ, рассчитанной для каждой пары точек (высот поверхности). Из распределения ВИ определяют следующие характеристики:

1) СВИ (характеризует степень упорядоченности структуры);

2) МВИ – максимальная взаимная информация (характеризует информационную емкость структуры) [10].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ

Экспериментальными образцами являлись структуры с массивом самоорганизованных КТ InAs/GaAs, выращенном без покровного слоя. На подложках GaAs методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭМОС) выращивали буферный слой n -GaAs. После этого выращивали слой InAs, из которого на поверхности формировался массив КТ [11]. Затем структура остывала в потоке арсина. В работе варьировалась температура и содержание In в процессе роста слоя КТ. Технологические параметры получения образцов с КТ представлены в табл. 1.

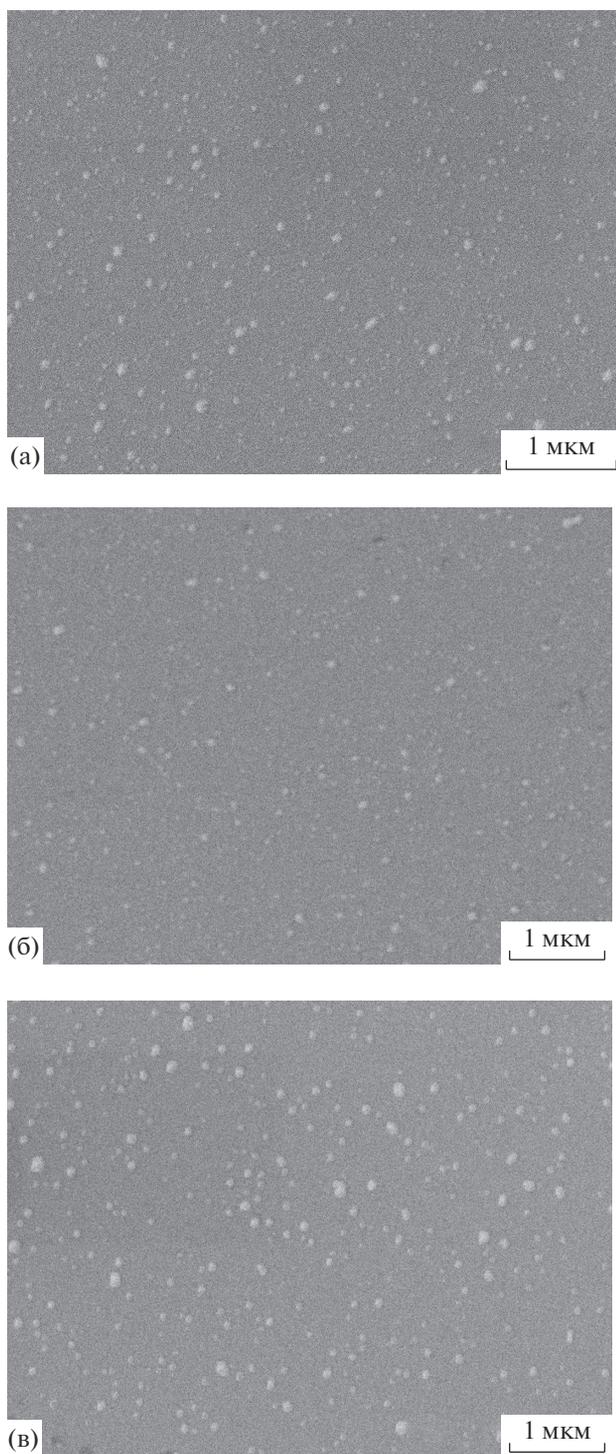


Рис. 1. РЭМ-изображения образцов с КТ InAs/GaAs: а – № 1; б – № 2; в – № 3.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Микроструктура поверхности образцов с КТ InAs/GaAs была исследована методом растровой электронной микроскопии (РЭМ), при этом ис-

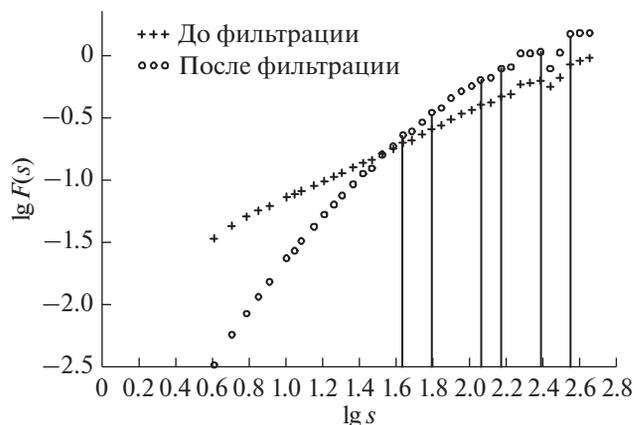


Рис. 2. Зависимость флуктуационной функции от масштаба для образца № 1.

пользовался растровый электронный микроскоп JSM-6610.

Как следует из РЭМ-изображений (рис. 1), на поверхности образцов присутствуют КТ различных размеров, причем определенная упорядоченность в расположении КТ отсутствует. Среди экспериментальных образцов наиболее крупными КТ обладает образец № 3, наиболее мелкими – образец № 2.

Также на РЭМ-изображениях (рис. 1) заметно, что в структуре поверхности присутствует шумовая составляющая. Поскольку рельеф поверхности структур с КТ представляет собой упорядоченные фигуры (полусферы) на плоскости, то анализ РЭМ-изображений методами 2DDFA и СВИ проводился в двух вариациях: сначала анализировался исходный рельеф, а потом подавлялась шумовая составляющая и также анализировался рельеф. Шумовая составляющая изображения поверхности подавлялась путем фильтрации с помощью непрерывного вейвлет-преобразования.

На рис. 2–4 представлены графики зависимости флуктуационной функции F от масштаба s [5, 6], полученные методом 2DDFA. Из графиков следует, что для не отфильтрованных РЭМ-изображений зависимости $F(s)$ практически прямолинейны и на них сложно выделить перегибы, по которым рассчитываются корреляционные вектора. Фильтрация изображений с помощью непрерывного вейвлет-преобразования позволила уменьшить шумовую составляющую в РЭМ-изображениях. В результате получились зависимости $F(s)$, на которых более четко прослеживаются перегибы. По ним рассчитывались корреляционные векторы d , представленные в табл. 2.

Значение корреляционного вектора соответствует периоду гармонических составляющих в структуре. Из полученных результатов видно, что больше всего корреляционных векторов суще-

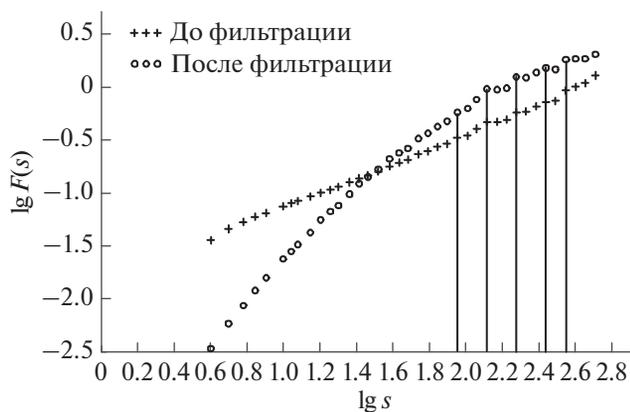


Рис. 3. Зависимость флуктуационной функции от масштаба для образца № 2.

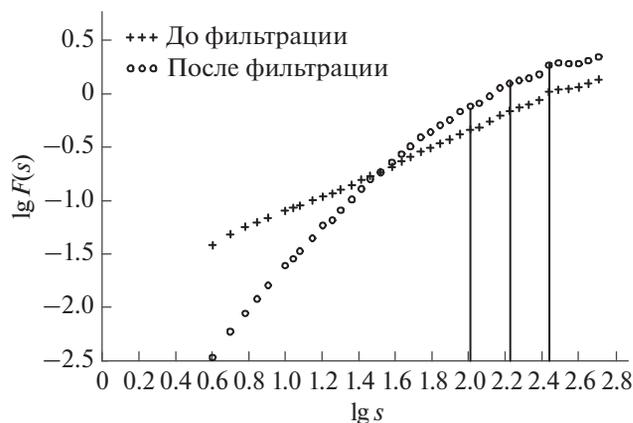


Рис. 4. Зависимость флуктуационной функции от масштаба для образца № 3.

ствует у образца № 1, а также у образца № 2. Образец № 3 имеет меньше корреляционных векторов. Образец № 3 был получен при более высокой температуре по сравнению с другими (табл. 1). По мнению авторов, повышенная температура в процессе роста структур с КТ InAs/GaAs привела к более упорядоченному расположению КТ на поверхности и поэтому присутствуют однотипные корреляционные векторы.

Анализ значений корреляционных векторов для образцов с КТ InAs/GaAs (табл. 2) показывает, что с учетом погрешности многие корреляционные векторы для разных образцов совпадают, например, 180 ± 30 нм (образец № 1), 200 ± 30 нм (образец № 2), 170 ± 30 нм (образец № 3). У образца № 3 самое маленькое значение корреляционного вектора составляет 170 ± 30 нм. Возможно, это связано с тем, что для образца № 3 наблюдались самые крупные КТ на поверхности. При этом они находятся друг от друга на большем расстоянии, чем более мелкие КТ. Поэтому возможно преобладание корреляционных свойств КТ большего размера.

Из графиков зависимости $F(s)$ также были определены скейлинговые показатели a (табл. 2). Расчет a производился путем вычисления танген-

са угла наклона зависимости $F(s)$ до первого перегиба. После перегиба показатель a не рассчитывался, поскольку на следующих участках это мало информативно и достаточно сложно в связи с малым количеством точек.

Скейлинговый показатель характеризует тип корреляций в структуре. Для всех РЭМ-изображений до фильтрации наблюдалось примерно одинаковое значение a (0.67; 0.69; 0.74 для образцов № 1, № 2, № 3 соответственно). После фильтрации РЭМ-изображений значение a возросло, что подтверждает повышение упорядоченности путем уменьшения шумовой составляющей. Однако значение a также осталось примерно одинаковым для всех отфильтрованных РЭМ-изображений (1.54; 1.60; 1.61 для образцов № 1, № 2, № 3 соответственно). Значение a в диапазоне от 0.5 до 2 соответствует длительным и нестепенным корреляциям [12, 13].

В табл. 3 представлены результаты расчета информационных характеристик методом СВИ. Значение СВИ позволяет охарактеризовать степень упорядоченности структуры. Также произведен расчет максимальной взаимной информации (МВИ), которая характеризует информационную емкость структуры.

Таблица 2. Результаты исследования РЭМ-изображений образцов с КТ InAs/GaAs методом 2DDFA

№ образца	a		d , нм (± 30 нм)
	до фильтрации	после фильтрации	
1	0.67	1.54	70, 100, 180, 250, 400, 580
2	0.69	1.60	140, 200, 300, 460, 580
3	0.74	1.61	170, 280, 460

Таблица 3. Результаты исследования РЭМ-изображений образцов с КТ InAs/GaAs методом СВИ

№ образца	МВИ		СВИ	
	до фильтрации	после фильтрации	до фильтрации	после фильтрации
1	0.311	0.474	0.0007	0.0041
2	0.338	0.475	0.0007	0.0062
3	0.347	0.506	0.0008	0.0064

Как видно из табл. 3, значения СВИ для всех РЭМ-изображений до фильтрации практически одинаковы и попадают в категорию структур с низкой упорядоченностью [12]. После фильтрации РЭМ-изображений значения СВИ увеличились, что говорит о повышении степени упорядоченности, однако по-прежнему остались в категории структур с низкой упорядоченностью (СВИ < 0.02 [12]).

Значения МВИ для РЭМ-изображений до фильтрации немного отличаются друг от друга. Наибольшее значение МВИ для неотфильтрованных РЭМ-изображений у образца № 3 (0.347). Значения МВИ для неотфильтрованных РЭМ-изображений попадают в категорию структур с низкой информационной емкостью и энтропией [12]. После фильтрации РЭМ-изображений значения МВИ также увеличились, что говорит о повышении информационной емкости и энтропии. При этом образец № 3 после фильтрации попал в категорию структур со средней информационной емкостью и энтропией (0.5 < МВИ < 0.7 [12]). Более высокие значения СВИ и МВИ у образца № 3 по сравнению с другими образцами можно связать с более упорядоченным расположением КТ на поверхности, а также с большим размером КТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ изображений поверхности структур с КТ InAs/GaAs методами 2DDFA и СВИ. Рассчитаны значения корреляционных векторов, скейлинговых показателей, СВИ и МВИ для исходных изображений и изображений, отфильтрованных непрерывным вейвлет-преобразованием. Фильтрация позволила выявить корреляционные векторы в структурах с КТ InAs/GaAs, которые невозможно было выявить для исходных изображений. Величины корреляционных векторов соответствуют расстояниям, на которых расположены КТ одних размеров.

Оценено влияние технологических режимов изготовления структур с КТ InAs/GaAs на упорядоченность массива КТ. Выявлено, что повышение температуры выращивания КТ от 480 до 520°C повышает упорядоченность расположения КТ на поверхности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования (РЦЗМ кп) при Рязанском государственном радиотехническом университете.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Self-Assembled Quantum Dots / Ed. by Wang Z.M., N.Y.: Springer, 2008. V. 1. 463 p. Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology. ISBN 978-0-387-74190-1.
2. Стрельчук В.В., Литвин П.М., Коломыс А.Ф. и др. // Физика и техника полупроводников. 2007. Т. 41. Вып. 1. С. 74.
3. Севрюк В.А., Брунков П.Н., Шальнев И.В. и др. // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47. Вып. 7. С. 921.
4. Alpatov A.V., Vikhrov S.P., Rybina N.V. // Semiconductors. 2015. V. 49. № 4. P. 456. <https://doi.org/10.1134/S106378261504003X>
5. Alpatov A.V., Vikhrov S.P., Vishnyakov N.V. et al. // Semiconductors. 2016. V. 50. № 1. P. 22. <https://doi.org/10.1134/S1063782616010048>
6. Алпатов А.В., Вихров С.П., Гришанкина Н.В., Мурсалов С.М. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 4. Часть 2. С. 12.
7. Alpatov A.V., Vikhrov S.P., Grishankina N.V. // Semiconductors. 2013. V. 47. № 3. P. 365. <https://doi.org/10.1134/S1063782613030020>
8. Alpatov A.V., Vikhrov S.P., Kazanskii A.G. et al. // Semiconductors. 2016. V. 50. № 5. P. 590. <https://doi.org/10.1134/S1063782616050031>
9. Луняков А.Е., Рыбина Н.В., Рыбин Н.Б. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 4. С. 153.
10. Вихров С.П., Рыбина Н.В., Бодягин Н.В. и др. // Сборник трудов Международной конференции "Аморфные и микрокристаллические полупроводники". 2018. С. 191.
11. Здоровейцев А.В., Демина П.Б., Звонков Б.Н. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 2. С. 15.
12. Вихров С.П., Рыбина Н.В., Бодягин Н.В. и др. Самоорганизующиеся структуры в электронике. Рязань: ИП Жуков В.Ю., 2017. 168 с.
13. Рыбина Н.В., Вихров С.П., Рыбин Н.Б. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 61. С. 143.

Investigation of Features of InAs/GaAs Structures with Quantum Dots by Information-Correlation Characteristics

N. V. Rybina^{1,*}, A. V. Zdorodeyshev¹, N. B. Rybin^{1,**}

¹Ryazan State Radio Engineering University (RSREU), Ryazan, 390005 Russia

²Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, 603950 Russia

*e-mail: pgnv@mail.ru

**e-mail: nikolay.rybin@yandex.ru

The paper presents a technique for calculating information-correlation characteristics based on the methods of average mutual information and two-dimensional detrended fluctuation analysis. Experimental samples were structures with an array of self-organized InAs/GaAs quantum dots grown without a cover layer by gas-phase epitaxy from metalorganic compounds. The microstructure of the samples' surface was studied by scanning electron microscopy. Information-correlation characteristics of InAs/GaAs structures with quantum dots were obtained using two-dimensional detrended fluctuation analysis and average mutual information. The order of the array of quantum dots in the InAs/GaAs structure is estimated depending on the applied technological modes of production. It was found that increasing the growing temperature of experimental samples from 480 to 520°C increases the ordering of the location of quantum dots on the surface.

Keywords: two-dimensional detrended fluctuation analysis, average mutual information method, information-correlation characteristics, ordering, surface, InAs/GaAs structure with quantum dots, continuous wavelet transform, correlation vector.