

УДК 53.043

## Размерные эффекты в процессах имплантации тяжелых ионов в эпитаксиальные слои n-GaAs(100)<sup>1</sup>

Торхов Н. А., Кривчук А. С.

*Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов  
ул. Красноармейская, 99 А, Томск, 634034, Россия  
trkf@mail.ru*

Получено: 8 сентября 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

**Аннотация:** В локальном приближении исследовано влияние процессов имплантации ионов хлора  $Cl^{++}$  в эпитаксиальные слои арсенида галлия GaAs{100} на фрактальные размерности  $D_f$  функциональных пространств  $\mathbf{S}$  слоевых сопротивлений  $R_{SH}$  эпитаксиальных слоев n-GaAs  $\mathbf{S}(R_{SH})$  и функциональных пространств  $\mathbf{S}(\rho_c)$  удельных сопротивлений сплавных  $\rho_c$  омических контактов. Обнаружено изменение внутренней геометрии исследуемых объектов под воздействием облучения.

**Ключевые слова:** имплантация, тяжелые ионы, размерный эффект, арсенид галлия, гетероэпитаксиальные структуры.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Торхов Н. А., Кривчук А. С. Размерные эффекты в процессах имплантации тяжелых ионов в эпитаксиальные слои n-GaAs // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2019. Т. 2, № 3. С. 416—426.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011):** Торхов, Н. А. Размерные эффекты в процессах имплантации тяжелых ионов в эпитаксиальные слои n-GaAs / Н. А. Торхов, А. С. Кривчук // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2019. — Т. 2, № 3. — С. 416—426.

---

<sup>1</sup> Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

## Size effects in the processes of large ion implantation into n-GaAs(100) epitaxial layers

N. A. Torkhov and A. S. Krivchuk  
Research Institute of Semiconductor Devices  
99a, Krasnoarmeyskaya Str., Tomsk, 634034, Russia  
e-mail: trkf@mail.ru

Received: September 8, 2019  
Peer-reviewed: September 13, 2019  
Accepted: September 16, 2019

**Abstract:** *The paper investigates in local approximation the influence of the processes of  $Cl^{++}$  ion implantation into gallium arsenide GaAs{100} epitaxial layers on fractal dimensions  $D_f$  of functional spaces  $\mathbf{S}(R_{SH})$  of n-GaAs epitaxial layer sheet resistances  $R_{SH}$  and functional spaces  $\mathbf{S}(\rho_c)$  of alloyed ohmic contact specific resistances  $\rho_c$ . It is found out that the internal geometry of the studied objects is changed under the action of irradiation.*

**Keywords:** *implantation, large ions, size effect, gallium arsenide, heteroepitaxial structures.*

**For citation (IEEE):** N. A. Torkhov et al. "Size effects in the processes of large ion implantation into n-GaAs(100) epitaxial layers," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 3, pp. 416–426, 2019. (In Russ.).

### 1. Введение

Характер рассеяния в процессах имплантации тяжелых ионов в полупроводники достаточно подробно освещен в мировой научной литературе. Исследования были направлены в основном на изучение физических механизмов проникновения имплантируемых частиц вглубь полупроводниковых материалов (по нормали к плоскости  $(x,y)$ ) в одномерном случае [1, 2].

Между тем, реальные процессы имплантации имеют заметные латеральные (в плоскости  $(x,y)$ ) неоднородности определяемые, с одной стороны, локальными неоднородностями в сечении потока имплантируемых частиц, обусловленными как конструктивными особенностями установки, так и физическими особенностями формирования микроструктуры потока, а, с другой стороны — латеральными неоднородностями полупроводниковых мишеней (мозаичная структура эпитаксиальных слоев, характер латерального распределения примесей и дефектов в объеме, фазового состава неровностей поверхности).

Латеральные размеры таких неоднородностей часто соизмеримы с размерами конструктивных элементов твердотельных приборов. Тем не менее в мировой научной литературе практически нет описаний физических механизмов формирования подобного рода неоднородностей в процессах имплантации тяжелых ионов.

Исходя из вышеизложенного, с применением методов фрактальной геометрии в локальном приближении в работе изучается изменение слоевого сопротивления (латеральной проводимости) эпитаксиального  $n$ -GaAs{100} под воздействием имплантированных ионов хлора  $Cl^{++}$ .

## 2. Методическая часть

Облучением ионами хлора  $Cl^{++}$  с энергией 240 КэВ и дозой 0.02 мкКл (облучение) подвергались эпитаксиальные  $n^+n$ -GaAs{100} мезоструктуры глубиной  $d=200$  нм. Толщина  $n^+$ -GaAs с концентрацией  $1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  составляла 50 нм, а  $n$ -GaAs с концентрацией  $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  — 100 нм.

Для измерения слоевого сопротивления (латеральной проводимости) эпитаксиальной структуры с учетом токов растекания методом длины переноса на поверхности мезоструктур формировались тестовые элементы с линейной геометрией контактных площадок LTLM (Linear Transmission Line Method [3]) на основе металлизации омических контактов (ОК)  $Au-GeNi$  с последующим их утолщением золотом до  $d_m=0.5$  мкм (рис. 1). Длина линий ширинами  $W_i=10, 20, 30, 50, 100, 150, 250$  и  $500$  мкм составляла  $L=20$  мкм с пошаговым увеличением расстояния  $l_j$  между соседними линиями как  $l_j=5, 10, 20, 40, 80, 160$  и  $320$  мкм. Данный метод, с одной стороны, позволяет достаточно точно измерять контактные сопротивления  $\rho_c (<10^{-7} \text{ Ом} \times \text{см}^2)$ , а с другой — выявлять размерные эффекты в их электрических характеристиках: слоевом сопротивлении полупроводника [ $R_{SK}=R_{\square}$ ]= $\Omega$  (известном, как размерность “Ом-на-квадрат”, или просто —  $\text{Ом} \equiv \Omega$ ), длиной токов растекания [ $L_T$ ]=мкм — расстоянием, на котором ток в области контакта уменьшается в  $e$  раз и относительным контактным сопротивлением [ $\rho$ ]= $\text{Ом} \times \text{см}^2$  (или [ $\rho^*$ ]= $\text{Ом} \times \text{мм}$ ) (1).

$$R_T = 2 \frac{L_T R_{SK}}{W} + \frac{l_i R_{SK}}{W}, \quad \rho = L_T^2 R_{SK}, \quad \rho^* = L_T R_{SK} \quad (1)$$

Конструктивные размеры тестов LTLM полностью удовлетворяли условию точного измерения токов растекания  $L > 5L_T$  [3]. В данных экспериментах  $L > 9L_T$ .

Размерные эффекты в параметрах  $R_{SK}$ ,  $L_T$  и  $\rho^*$  определенных из (1) графическим методом часто проявляются в зависимости их значений от

линейных размеров (например,  $W_i$ ) конструкций тестов LTLM. Во многих практически значимых случаях такие эффекты определяются фрактальной геометрией внутренней структуры тестов [4, 5].

Измерение последовательного сопротивления  $R_T$  между линиями ОК на исходном и облученном образцах осуществлялось измерителем электрических характеристик полупроводниковых приборов В1500А производства Keysight Technologies четырехзондовым методом Кельвина (два зонда "sensor" и "force" на одном линейном контакте и два "sensor" и "force" — на соседнем, рис. 1) с помощью зондовой станции Cascade MicroTech M150. Собственное сопротивление короткозамкнутой измерительной системы не превышало 0.04 Ом.

Для определения Хаусдорфовой размерности  $D_H$  функциональных пространств  $\mathbf{s}(R_{SH})$  и  $\mathbf{s}(\rho_c)$  использовался метод, основанный на определении размерности подобия  $D_S$  путем подсчета относительного увеличения меры объекта  $M$  в  $\eta = M_i/M_0$  раз при относительном уменьшении линейных размеров (ширины  $W_i$ ) в  $\zeta = W_i/W_0$ , раз (2) [2, 3]. В рассматриваемых частных случаях Хаусдорфова размерность метрических пространств равна фрактальной размерности объекта  $D_H = D_f$ .

$$D_f = 2D_T - D_S = 2D_T - \frac{\ln(\eta)}{\ln(\zeta)} \quad (2)$$

Для фрактальных объектов значение  $D_f$  по условию Мандельброта должно быть больше значения топологической размерности Евклидова пространства  $D_f > D_E = D_T$ .

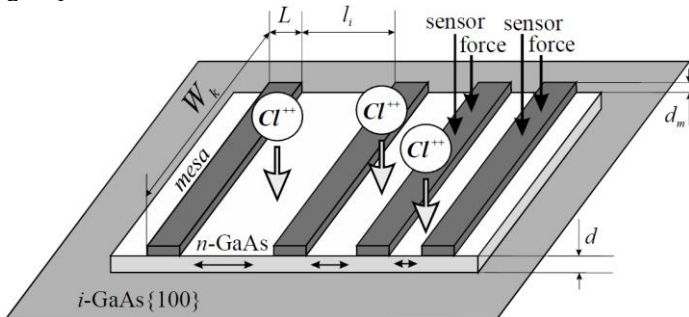


Рис. 1. Схема эксперимента по имплантации ионов хлора  $Cl^{++}$  в эпитаксиальные слои  $n^+-n$ -GaAs {100} тестов LTLM.

Fig. 1. Scheme of the experiment on the implantation of  $Cl^{++}$  chlorine ions into the epitaxial layers of  $n^+-n$ -GaAs {100} LTLM tests

В качестве линейных размеров объектов будем рассматривать ширину линий  $W_i$  являющуюся элементом метрического пространства  $R$

сформированного парой  $R=\{X, \rho\}$ , состоящей из некоторого множества  $X=\{x_i\}$  размеров конструкций элементов тестов LTLM, в котором определено расстояние  $\rho$  между любой парой элементов с аксиомами треугольника, симметрии и нулевого расстояния [6]. Из (2) следует, что топологическая размерность  $D_T$  линейных тестов LTLM равна единице  $D_T=1$ , а поверхности эпитаксиальной структуры — двум  $D_T=2$ .

В качестве интересующих нас мер  $M_k$  тестов LTLM будем рассматривать интегральные характеристики  $\Phi_{1,i} \equiv R_{SH,i}$  и  $\Phi_{2,i} \equiv \rho_{c,i}$ , являющиеся элементами (функционалами  $\Phi_{k,i}$ ) функциональных пространств.

Связь функционального пространства с метрическим можно организовать, поставив в соответствие каждой области из множества метрического пространства  $R$  некий функционал  $\Phi$  из функционального пространства  $M_k$  набора мер  $\{M_{k,i}\}$  описывающих некую  $k$ -ю аддитивную (интегральную) электрофизическую характеристику, где  $k=1, 2, \dots, K$  — количество мер  $M_k=\{M_{k,i}\}$ , а  $i=1, 2, \dots, N$  — количество элементов образующих каждую такую  $k$ -ю меру. При этом все аргументы функций  $\Phi \equiv M_{k,i}$  линейного пространства  $M_k$  должны принадлежать множеству метрического пространства  $R$ .

Объединение  $R$  и  $M_k$  образует метрическое пространство с мерой  $S_{M,k}=\{R, M_k\}$ , представляющее собой совокупность элементов метрического пространства  $R$ , в зависимость от которого (через аргументы) поставлено в соответствие некоторое множество мер  $M_{k,i}$  из линейного функционального пространства  $M_k$  [6]. При этом размерность как метрических пространств  $R$ , так и функциональных пространств  $M_k$  может укладываться в топологические размерности евклидовых пространств, так как может быть выражена любым вещественным числом от 1 до 3.

Например, интегралы от функции плотности электрического тока, удельного сопротивления, плотности электрического заряда или массы можно рассматривать в качестве мер, характеризующих проводящие, емкостные и массогабаритные свойства передающих линий. В отличии от метрического пространства  $R$ , меры (функционалы  $\Phi$ ) функционального пространства могут иметь и отрицательные значения, как, например, меры электрических зарядов.

Согласно [7] мера фрактального объекта в зависимости от его линейного размера  $W_i$  может быть выражена следующим образом:

$$M_{k,i} = M_0 \left( \frac{W_i}{W_0} \right)^{2D_T - D_f} \quad (3)$$

откуда легко можно определить значение  $D_f$  как

$$D_f = 2D_T - \frac{\ln\left(\frac{M_{k,i}}{M_{k,0}}\right)}{\ln\left(\frac{W_i}{W_0}\right)} \quad (4)$$

Для больших линейных размеров, в случае предельного перехода из локального приближения в глобальное — размер  $L$ , при котором значения размерностей  $D_f=D_T$  начинают совпадать, выражение (3) переходит в известное выражение для объектов с целой топологической размерностью:

$$M_{k,i} = M_{k,0} \left(\frac{W_i}{W_0}\right)^{D_T}. \quad (5)$$

Известно, что элементам функционального пространства (функционалам) могут быть присущи основные свойства метрических пространств: свойство треугольника, симметрии и нулевого расстояния [6]. Поэтому, как показано в [8, 9], для определения значений  $D_S$  и  $D_f$  функциональных пространств  $M_k$  можем воспользоваться выражениями (2) и (4), где в качестве  $M_0$  будем пользоваться минимальными значениями  $R_{SH,0}=R_{SH}(W_0)$  и  $\rho_{c,0}^*=\rho_c^*(W_0)$ .

В данных экспериментах количество  $N=7$  определяется количеством межлинейных интервалов в тестах LTLM, а  $k=2$ , так как будут рассмотрены только две меры  $M_1=\{M_{1,i}\}$  и  $M_2=\{M_{2,i}\}$ , где  $M_{1,i}=R_{SH,i}$  и  $M_{2,i}=\rho_{c,i}^*$ . Таким образом, согласно [9], наборы сопротивлений  $R_{SH(1,i)}$  и  $\rho_{c(2,i)}^*$  могут быть найдены из подобных выражений:

$$R_{SH,i} = R_{SH,0} \left(\frac{W_0}{W_i}\right)^{D_T-D_f} \quad \text{и} \quad \rho_{c,i}^* = \rho_{c,0}^* \left(\frac{W_0}{W_i}\right)^{D_T-D_f} \quad (6)$$

В качестве  $W_0$  выбиралось минимальное значение ширины линий LTLM  $W_0=10$  мкм (таб. 1).

Выражения (6) описывают также и случай предельного перехода элементов функциональных пространств слоев и удельных сопротивлений из локального приближения в глобальное, когда значения размерностей  $D_f$  и  $D_T$  совпадают, а  $R_{SH,i}=R_{SH,0}$  и  $\rho_{c,i}^*=\rho_{c,0}^*$  перестают зависеть от линейных размеров  $W_i$ .

### 3. Результаты эксперимента

Полученные результаты измерения значений  $R_T$  выявили наличие сильных размерных эффектов как на исходном (рис. 2, а), так и на облуженном (рис. 2, б) образцах.

Фрактальная размерность пространства слоев сопротивлений  $\mathbf{S}(R_{SH})$  исходных тестов LTLM при  $W \geq 100$  мкм ( $L=100$  мкм) соответствует двумерному случаю  $D_f \approx 2$  плоской двумерной поверхности с  $D_T=2$  (таб. 1). Согласно вышеизложенному, случай, когда  $D_f=D_T$  относится к глобальному приближению. Двухмерность в глобальном приближении функционального пространства  $\mathbf{S}(R_{SH})$  исходных тестов LTLM указывает, по всей вероятности, на то, что формирование  $R_{SH}$  эпитаксиальной тонкопленочной структуры обусловлено в основном двумерными процессами рассеяния при диффузионном переносе электронов.

При  $W < 100$  мкм значения  $D_f$  начинают превышать  $D_T$  и наступает случай локального приближения ( $W < L$ ), когда в определении слоев сопротивлений  $R_{SH}$  начинает наблюдаться размерный эффект — значительная зависимость значений  $R_{SH}$  от  $W_i$  (таб. 1). В этом случае дробные значения  $2 < D_f < 3$  указывают на то, что в формировании  $R_{SH}$  принимают участие не только двумерные, но и в некоторой степени трехмерные процессы рассеяния, вызванные, по всей вероятности, на трехмерных неоднородностях эпитаксиальных слоев.

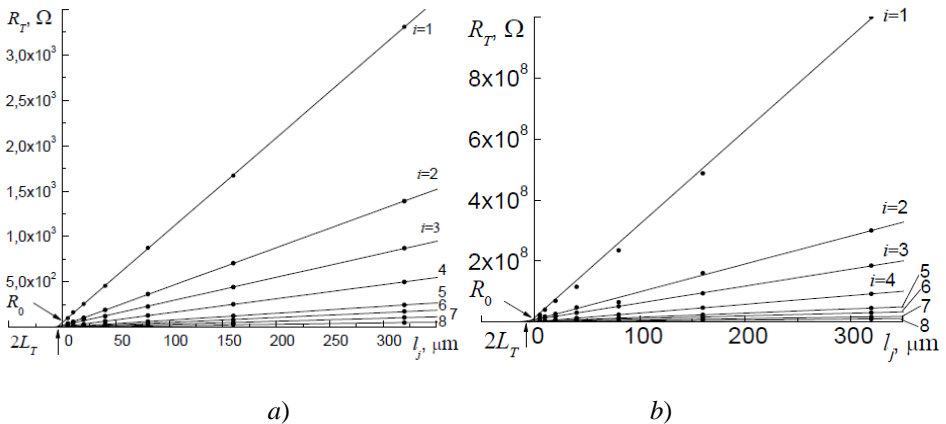


Рис. 2. Линейные зависимости  $R_T(l)$  тестов LTLM для разных значений  $W_i$ : 1—10 мкм, 2—20, 3—30, 4—50, 5—100, 6—150, 7—250 и 8—500 мкм: (а) исходного и (б) подвергнувшегося имплантации ионов  $\text{Cl}^{++}$  с дозой  $Q=0.02$  мкКл.

Fig. 2. Linear dependences  $R_T(l)$  of LTLM tests for different values of  $W_i$ : 1—10  $\mu\text{m}$ , 2—20, 3—30, 4—50, 5—100, 6—150, 7—250, and 8—500  $\mu\text{m}$ : (a) the initial and (b) implanted  $\text{Cl}^{++}$  ions with a dose of  $Q=0.02$   $\mu\text{C}$

Значение фрактальной размерности пространства удельных сопротивлений ОК  $\mathbf{S}(\rho_c^*)$  исходных тестов LTLM, начиная уже с  $W_i < 500$  мкм ( $L \approx 500$  мкм), заметно превышают одномерный случай  $D_f > D_T$  — линейную

геометрию метрического пространства  $R$  тестов LTLM с  $D_f=1$  (табл. 1). Это говорит о том, что по мере уменьшения  $W_i$  в формировании токов растекания, а, следовательно, и  $\rho_c^*$  при диффузионном переносе электронов в плоскости эпитаксиальной структуры оказывают возрастающее влияние и двухмерные процессы рассеяния.

Необычно ведет себя и параметр длины токов растекания  $L_T$ . Уменьшение ширины тестов  $W_i$  начиная с 50 мкм сопровождается заметным увеличением длины  $L_T$ , что очередной раз подтверждает наличие значительных размерных эффектов в электрических характеристиках тестов LTLM.

Имплантация ионов  $Cl^{++}$  в эпитаксиальные слои тестов LTLM с дозой  $Q=0.02$  мкКл приводит к значительному увеличению значений фактальных размерностей обоих пространств  $S(R_{SH})$  и  $S(\rho_c^*)$  (таб. 1), что указывает на значительное изменение геометрии процессов рассеяния электронов как в глобальном ( $W \geq L$ ), так и в локальном ( $W < L$ ) приближениях. Значительное расширение интервала линейных размеров  $W_i$  до 500 мкм ( $L \geq 500$  мкм), в котором размерность функционального пространства  $S(R_{SH})$  принимает дробные значения  $2 < D_f < 3$ , указывает на то, что в формировании  $R_{SH}$  после имплантации даже для относительно больших размеров  $W_i > 100$  мкм начинают принимать участие трехмерные процессы рассеяния. Центрами такого рассеяния, по всей вероятности, могут являться трехмерные неоднородности, образованные имплантацией ионов хлора  $Cl^{++}$  в эпитаксиальные слои  $n^+-n-GaAs$ .

Таблица 1. Значения параметров LTLM —тестов в зависимости от  $W_i$  [1].

Table 1. Parameters of LTLM tests depending on  $W_i$  [1].

$i$	$W_i$ , мкм	Исходные значения параметров тестов LTLM					Значения параметров тестов LTLM после облучения ионами $Cl^{++}$ дозой $Q=0.02$ мкКл				
		$L_T$ , мкм	$R_{SH}$ , $\Omega/\square$	$D_f(R_{SH})$	$\rho_c^*$ , $\Omega \times \text{мм}$	$D_f$	$L_T$ , мкм	$R_{SH}$ , $\text{K}\Omega/\square$	$D_f(R_{SH})$	$\rho_c^*$ , $\Omega \times \text{мм}$	$D_s$
1	10	2.7	101.6	2.24	0.27	1.51	2.9	30996	2.67	7415	2.95
2	20	2.4	85.7	2.22	0.19	1.37	2.9	19464	2.57	57410	1.93
3	30	2.3	79.4	2.17	0.18	1.45	3.8	16543	2.48	62070	1.36
4	50	1.7	77.4	2.13	0.13	1.32	4.6	14221	2.35	65682	0.99
5	100	1.7	76.0	2.09	0.13	1.24	5.3	13773	2.31	73423	1.18
6	150	1.7	80.5	2.07	0.14	1.20	13.9	13224	2.29	183486	0.99
7	250	1.8	82.2	2.06	0.14	1.19	15.8	12131	2.23	181781	0.97
8	500	1.7	79.1	---	0.13	---	26.3	12604	---	330884	---



Более сильное влияние процесс имплантации оказывает на размерность функционального пространства удельных сопротивлений  $\mathbf{S}(\rho_c^*)$ , проявляющееся в значительном увеличении их фрактальной размерности  $D_f$  и уменьшении предела локального приближения  $L$ . В этом случае даже для  $W_i \geq 50$  мкм фрактальная размерность  $\mathbf{S}(\rho_c^*)$   $D_f = 1 + D_S$  значительно превышает топологическую размерность линейных элементов LTLM  $D_f > D_T = 1$  и практически совпадает с топологической размерностью плоской поверхности  $D_f = D_T = 2$ . Это говорит о том, что под воздействием процессов имплантации в формировании  $\rho_c^*$  начинают преобладать двумерные процессы рассеяния.

Уменьшение ширины тестовых элементов  $W_i < 50$  мкм приводит к еще более сильному постепенному увеличению значений фрактальной размерности функционального пространства  $\mathbf{S}(\rho_c^*)$ . Так, при уменьшении  $W_i$  от 30 мкм до 20 мкм значение размерности подобия  $D_S$  увеличивается от 1.36 до 1.93 (табл. 1), а значения  $D_f = 1 + D_S$  функционального пространства  $\mathbf{S}(\rho_c^*)$  начинают попадать теперь в интервал  $2 < D_H(\rho_c^*) < 3$  (таб. 1). Существенное увеличение значений  $D_f$  до 2.93 в этом случае может указывать на то, что в формировании  $\rho_c^*$  начинают преобладать уже трехмерные эффекты рассеяния. По всей вероятности, это обусловлено увеличением размерности геометрии метрического пространства  $R$  сплавных переходных слоев омических контактов в области токов растекания  $L_T$ .

Дальнейшее уменьшение  $W_i$  до 10 мкм приводит к еще большему увеличению значения размерности подобия  $D_S$  до 2.95 (таб. 1). В этом случае значение  $D_f = 1 + D_S$  функционального пространства  $\mathbf{S}(\rho_c^*)$  можно представить в виде суммы размерностей подпространств  $D_f = D_{f1} + D_{f2}$ . В качестве  $D_{f1} = 1$  можно взять значение топологической размерности исследуемых линейных объектов LTLM. Тогда для  $D_{f2}$  остается принять значение 2.95, количественно равное значению размерности подобия  $D_S$  (табл. 1). Такое представление  $D_f$  может указывать на то, что при  $W_i \leq 10$  мкм происходит резкое изменение геометрии интерфейса, когда в формировании  $\rho_c^*$  в одинаковой степени могут принимать участие как линейные, так и трехмерные эффекты.

В отличие от значений  $L_T$  исходных тестов LTLM увеличение ширины тестов в ряду  $W_1 - W_8$  после имплантации сопровождается значительным увеличением длин растекания  $L_T$  (табл. 1). Данный факт также не является тривиальным и подтверждает существенное влияние имплантации на геометрию процессов, происходящих в тестах LTLM не только в локальном, но и глобальном приближении.

Для дозы  $Q=0.03$  мкКл значения слоевых сопротивлений  $R_T$  превышают  $10^9$  Ом и адекватное восстановление остальных параметров тестов становится невозможным.

## 5. Заключение

Увеличение дозы облучения ионами хлора  $Cl^{++}$   $Q$  приводит к существенному росту значений  $R_{SH}$ ,  $\rho_c$  и  $L_T$ , что сопровождается значительным увеличением размерности  $D_f$  их функциональных пространств  $S$ . Для  $S(R_{SH})$  наблюдается увеличение предела локального приближения с  $L \approx 100$  мкм (для исходного образца) до  $L \approx 500$  мкм для подвергнутого имплантации (табл. 1). Для  $S(\rho_c^*)$  рост значения  $L \approx 500$  мкм не обнаружен по причине конструктивного ограничения максимальной ширины  $W_i$  тестовых элементов. Уменьшение ширины тестов  $W_i$  начиная с 50 мкм сопровождается нетривиальным увеличением длины  $L_T$  вызванном, по всей вероятности, фрактальной геометрией интерфейса.

Изменение размерностей  $D_f$  и пределов локальных приближений  $L$  функциональных пространств  $S(R_{SH})$  и  $S(\rho_c^*)$  после проведения процессов имплантации указывает на значительное изменение внутренней геометрии объекта под воздействием облучения в достаточно широком интервале масштабов  $L \geq 500$  мкм. При этом сильное увеличение значений  $D_f$  в интервале от 1 до 3 указывает на то, что на изменение электрофизических параметров тестов LTLM с линейной геометрией оказывают влияние как двумерные, так и трехмерные эффекты. При этом с увеличением ширины тестов LTLM наблюдается не уменьшение, а увеличение значений  $L_T$ . Это может указывать на то, что процессы имплантации  $Cl^{++}$  оказывают значительно большее влияние на геометрию объектов не только в локальном, но и в глобальном приближении.

## Список литературы

1. Комаров Ф. Ф., Комаров А. Ф. Физические процессы при ионной имплантации в твердые тела. Минск : УП «Технопринт», 2001.
2. Nastasi M., Mayer J. W. Ion Implantation and Synthesis of Materials. Springer Series in Materials Science. 2006. 266 p.
3. Новицкий С. В. Методологические аспекты измерения удельного контактного сопротивления TLM методом с линейной и радиальной геометрией контактов. Материалы электронной техники. Петербургский журнал электроники. 2013. Т. 3. С. 59—71.
4. Торхов Н. А., Новиков В. А., Ивонин И. В. Влияние размерных эффектов на контактное сопротивление омических контактов. В кн. : 25-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2015 (Севастополь, 6—12 сент. 2015 г.). 2015. С. 609—610.

5. Торхов Н. А. Размерные эффекты в электрических характеристиках омических контактов к AlGaIn/GaN гетероэпитаксиальным структурам. 7-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. «Моковские чтения». Москва, 25 мая 2016 г. С. 51—52.
6. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. М. : Наука, 1976. 543 с.
7. Torkhov N. A. Method to Determine the Interface's Fractal Dimensions of Metal–Semiconductor Electric Contacts from Their Static Instrumental Characteristics // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2010. Vol. 4, No. 1. Pp. 45—58.
8. Torkhov N. A., Babak L. I., Kokolov A. A. The Influence of AlGaIn/GaN Heteroepitaxial Structure Fractal Geometry on Size Effects in Microwave Characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs // Symmetry. 2019, 11, 1495.
9. Торхов Н. А. Слоевое сопротивление TiAlNiAu тонкопленочной металлизации омических контактов к нитридным полупроводниковым структурам // ФТП. 2019. Т. 53, № 1. С. 32—40.

### Информация об авторах

**Торхов Николай Анатольевич**, ведущий инженер-технолог ЦК ТКИС АО «НИИПП» Россия, 634034, г. Томск, ул. Красноармейская 99 А. ORCID 0000-0003-0466-881X.

**Кривчук Александр Сергеевич**, ведущий инженер-технолог ЦК ТКИС АО «НИИПП» Россия, 634034, г. Томск, ул. Красноармейская 99 А.

### Information about the authors

**Nikolay A. Torkhov**, Leading Process Engineer of the Scientific-Research Institute of Semiconductor Devices, Russian Federation, 634034, Tomsk, Krasnoarmeiskaya Str. 99A. ORCID 0000-0003-0466-881X.

**Aleksandr S. Krivchuk**, Leading Process Engineer of the Scientific-Research Institute of Semiconductor Devices, Russian Federation, 634034, Tomsk, Krasnoarmeiskaya Str. 99A.