



# Новые материалы в оптоэлектронике



Любовь ЖУРАВЛЁВА  
Lyubov M. ZHURAVLEVA

Михаил ИВАШЕВСКИЙ  
Mikhail R. IVACHEVSKY



Ильдар МУЗАФАРОВ  
Ildar F. MUZAFAROV

*Журавлёва Любовь Михайловна* — доктор технических наук, профессор Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия.

*Ивашевский Михаил Романович* — ведущий инженер Московско-Рязанского регионального центра связи Московской дирекции связи ОАО «РЖД», Москва, Россия. *Музафаров Ильдар Фирдаусович* — студент Российского университета транспорта (МИИТ), Москва, Россия.

## New Materials in Optoelectronics

(текст статьи на англ. яз. —  
English text of the article — p. 80)

**В статье рассмотрены актуальные вопросы повышения эффективности оптоэлектронных устройств на основе новых материалов. Отмечено, что наиболее перспективным направлением исследований является проектирование полупроводниковых материалов с помощью собственных изотопов химических элементов. Так, очистка от тяжёлых изотопов исходных веществ повышает быстродействие оптоэлектронных устройств, квантовую эффективность, чувствительность фотоприёмников. Наибольший эффект от изотопической очистки можно получить для наноструктурированного материала (сверхрешётки). Его применение позволит создать более чувствительные приборы для ночного видения, солнечных батарей, систем обеспечения безопасности, медицинского оборудования, фотоприёмники сверхдлинного инфракрасного диапазона.**

Ключевые слова: оптоэлектроника, связь, изотопы, очистка, квантовая эффективность, сверхрешётки.

**Э**лектроника и оптоэлектроника как её составная часть являются основой высокотехнологичных отраслей мировой индустрии. К ним относятся производства высокоскоростных телекоммуникационных систем, устройств обеспечения безопасности, медицинских диагностических приборов, элементной базы квантовых систем передачи и обработки информации и т.д. Один из приоритетов здесь — разработка полупроводниковых материалов на новых физико-технологических принципах и анализ возможностей производства наноструктур нового поколения [1].

Таким перспективным направлением в оптоэлектронике стала работа с изотопическими материалами. Это молодая область науки, занимающаяся проектированием полупроводников с помощью собственных изотопов химических элементов для получения новых эффектов и оптоэлектронных характеристик. Примером изотопического материала может быть разновидность графита — графен. Для ис-

пользования в электронике его уникальных свойств необходимо «открытие запрещённой зоны» [2, 12]. Искомый эффект можно получить путём повышения процентного содержания тяжёлого изотопа. Противоположное направление проектирования — изотопическая очистка исходного вещества от тяжёлых изотопов.

Уменьшение концентрации тяжёлых изотопов в исходном химическом элементе улучшает оптоэлектронные характеристики полупроводникового материала, повышая прежде всего быстродействие приборов. Для этого применяется технология газового центрифугирования (ГЦФ). Затем изотопически очищенное вещество используется для формирования наноструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [1, 4, 5]. Освобождение исходного химического элемента от тяжёлых изотопов позволяет уменьшить дефекты кристаллической решётки и механические напряжения между слоями [1].

## ОЦЕНКА ИЗОТОПИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Эффективность уменьшения концентрации тяжёлых изотопов в полупроводниках можно оценить на примере улучшения свойств арсенида галлия при его использовании в фотоприёмнике (ФП). Эти улучшения отражаются прежде всего на повышении коэффициента поглощения  $\alpha$  и квантовой эффективности материала  $\eta$ .

Изотопический состав галлия в кристалле  $GaAs$  имеет следующий порядок: 60,1 % приходится на изотоп  $^{69}Ga$  и 39,9 % — на более тяжёлый изотоп  $^{71}Ga$ .

Снижение концентрации  $^{71}Ga$  можно трактовать как уменьшение количества дефектов в кристаллической решётке, которое отразится на эффективной массе носителей заряда, например, электрона  $m_{эф}$  и ширине запрещённой зоны  $E_g$ . Возможные масштабы изменений  $m_{эф}$  и  $E_g$  можно оценить по материалам публикации [7], в которой приведены результаты исследований зависимости эффективной массы электрона и ширины запрещённой зоны от изменений концентрации легирующих атомов в монокристаллах арсенида галлия. Так, уменьшение концентрации тяжёлого изотопа  $^{71}Ga$  в кристалле арсенида галлия на два порядка может уменьшить: 1) ши-

рину  $E_g$  — на 0,06 эВ; 2) величину  $m_{эф}$  — в два раза. Это приведёт преимущественно к повышению коэффициента поглощения и квантовой эффективности.

Следует отметить, что наибольшее влияние на оптоэлектронные характеристики материала ФП оказывает квантовая эффективность  $\eta$ .

Известно, что квантовая эффективность оценивается формулой [8]:

$$\eta = 1 - e^{-\alpha d}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент поглощения,  $d$  — толщина образца.

Коэффициент поглощения [9]:

$$\alpha = K \sqrt{h\nu - E_g}, \quad (2)$$

где  $h\nu$  — энергия фотона (произведение постоянной Планка и частоты света). Зависимость коэффициента поглощения от энергии фотона  $\alpha = f(h\nu)$  — прямо пропорциональная. Из графика зависимости  $\alpha = f(h\nu)$  для арсенида галлия [9] можно считать коэффициент пропорциональности  $K$ , исходя из соотношения

$$0,8 \cdot 10^4 = K \sqrt{1,5 - 1,42}, \left( \frac{1}{\text{см}} \right). \quad (3)$$

Следовательно,  $K = 2,827 \cdot 10^4 \text{ (см}^{-1} \text{ эВ}^{-1/2})$ .

Так, после изотопической очистки галлия от тяжёлых изотопов коэффициент поглощения будет:

$$\alpha = 2,827 \cdot 10^4 \sqrt{1,5 - 1,36} = 1,058 \cdot 10^4, \left( \frac{1}{\text{см}} \right). \quad (4)$$

Эффективность изотопической очистки галлия заключается в повышении квантовой эффективности за счёт увеличения коэффициента поглощения. К примеру, для объёмного кристалла из арсенида галлия толщиной  $d = 10^{-4} \text{ см}$  на основании формул (1)–(4) получим:

$$\frac{1 - e^{-1,058 \cdot 10^4 \cdot 10^{-4}}}{1 - e^{-0,8 \cdot 10^4 \cdot 10^{-4}}} = 1,23 \text{ раза.} \quad (5)$$

То есть величина  $\eta$  после очистки от тяжёлых изотопов увеличилась в 1,23 раза.

Известно, что квантовая эффективность  $\eta$  определяет чувствительность, обнаружительную способность материала ФП и, главное, величину фототока [8]. Отсюда отношение мощностей сигнала к шуму на выходе ФП  $\rho_{\text{выхфп}}^2$  до и после изотопической очистки объёмного кри-



Рис. 1. Сверхрешётки (МКЯ) на изотопах кремния (а – квантовая яма, b – барьер).

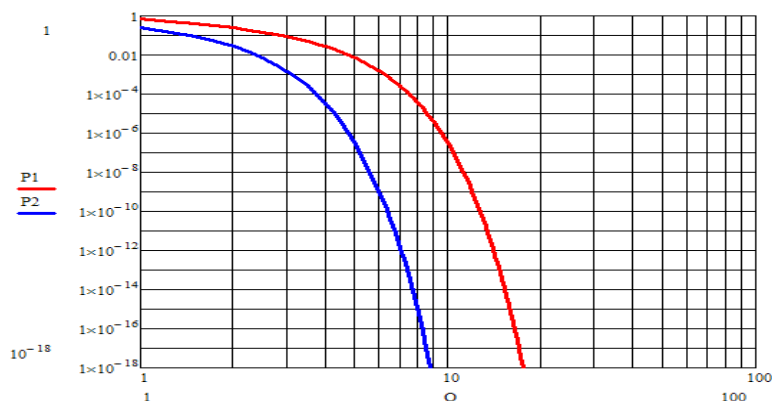
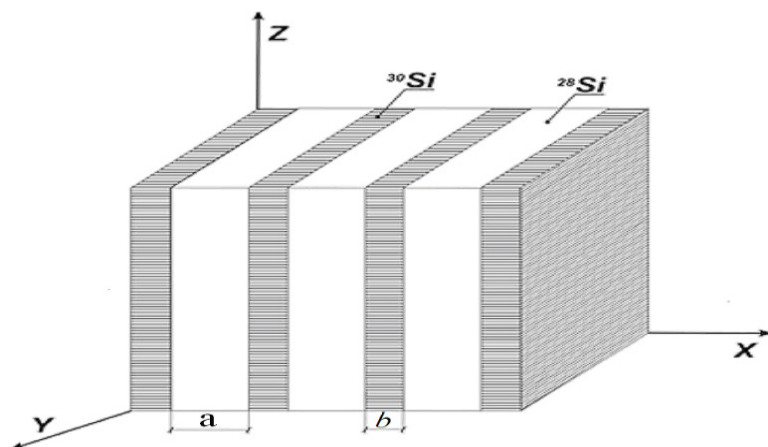


Рис. 2. Зависимость  $P_{ош} = f(Q)$  для ФП без очистки ( $P_1$ ) и с очисткой ( $P_2$ ).

сталла также увеличится в 1,23 раза. Это приведёт к уменьшению вероятности ошибки  $P_{ош}$  и улучшению качества приёма оптических сигналов [10].

Более эффективным материалом для фотоприёмников являются наноструктуры. Это – множественные квантовые ямы (МКЯ) и сверхрешётки (СВР), состоящие из чередования слоёв, например, арсенида галлия (ямы) и алюмината арсенида галлия (барьеры) или изотопов кремния (рис.1) [1]. Отличия между МКЯ и СВР в размерах  $a$  и  $b$  (для СВР  $a = b < 6$  нм).

Для квантовых ям значение  $d$  имеет порядок  $d = 10^{-6}$  см (10 нм). Отсюда формула (1) для расчёта  $\eta$  преобразуется [6]:

$$\eta \approx \alpha_{IQW} \quad (6)$$

После изотопической очистки получим следующие изменения (увеличение) квантовой эффективности для арсенида галлия в расчёте на одну квантовую яму:

$$\frac{1,06 \cdot 10^4 \cdot 10^{-6}}{0,8 \cdot 10^4 \cdot 10^{-6}} = 1,325 \text{ раза.}$$

Таким образом, в результате изотопической очистки материала в виде МКЯ в 1,325 раза увеличится  $\eta$ , чувствительность ФП, обнаружительная способность и фототок, величина  $\rho_{\text{выхфп}}^2$ , определяющая качество приёма ФП.

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ФОТОПРИЁМА

Используя полученный результат от изотопической очистки материала ФП на МКЯ, а именно, увеличение значений параметра  $Q^2$  и  $\rho_{\text{выхфп}}^2$  ( $\rho_{\text{выхфп}}^2 = 4 Q^2$ ) более чем в 1,3 раза, рассчитаем вероятность ошибки  $P_{ош}$  и аномальную погрешность  $\delta_{ан}^2$  [8] соответственно по формулам (7) и (8):

$$P_{ош} = \frac{2}{\sqrt{2\pi\rho_{\text{выхфп}}^2}} \exp\left(-\frac{\rho_{\text{выхфп}}^2}{4}\right); \quad (7)$$

$$\delta_{ан}^2 \approx 12P_{ош}. \quad (8)$$

На рис. 2 представлены графики вероятности ошибки для ФП на материале с очисткой  $P_{ошоч} = f(Q)$  и без очистки

Таблица 1

Вероятность ошибки на выходе фотоприёмника до очистки  $P_{ош}$  и после изотопической очистки  $P_{ошоч}$

$\rho_{фп}^2$	$P_{ош}$	$P_{ошоч}$
50	$0,142 \cdot 10^{-6}$	$1,54 \cdot 10^{-8}$
100	$1,12 \cdot 10^{-12}$	$1,68 \cdot 10^{-15}$
200	$1,08 \cdot 10^{-23}$	$2,8 \cdot 10^{-29}$

$$m = \frac{2}{\sqrt{K \rho_{выхфп}^2 2\pi}} \exp\left(-\frac{\rho_{выхфп}^2 K}{4 \cdot 2}\right) / \frac{2}{\sqrt{\rho_{выхфп}^2 2\pi}} \exp\left(-\frac{\rho_{выхфп}^2 K}{4 \cdot 2}\right),$$

$$m = (\sqrt{K}) \cdot \exp\left(\frac{\rho_{выхфп}^2 (K-1)}{4 \cdot 2}\right) = \sqrt{1,325} \exp\left(\frac{50 \cdot 0,325}{4 \cdot 2}\right) = 11,51 \text{ раза} \quad (9)$$

$P_{ош} = f(Q)$  от тяжёлых изотопов, построенные на основании формулы (7).

После изотопической очистки материала вероятность ошибки  $P_{ошоч}$  уменьшается на несколько порядков.

Эффективность очистки материала от тяжёлых изотопов в численном выражении представлена в таблице 1. В ней приведены значения вероятностей ошибки до изотопической очистки материала ФП и после неё.

На основании рассчитанных значений вероятности ошибки в таблице 1 можно оценить, во сколько раз улучшится качество приёма оптических сигналов за счёт повышения технических (оптоэлектронных) характеристик полупроводникового материала (арсенида галлия) после изотопической очистки (повышения квантовой эффективности, чувствительности, уменьшения шумов). Так, для минимально допустимого значения  $\rho_{выхфп}^2 = 50$ , обеспечивающего вероятность ошибки  $0,421 \cdot 10^{-6}$  согласно формуле (7), очистка материала позволит снизить вероятность ошибки в 11,51 раза. Сделать расчёт возможного выигрыша  $m$  по улучшению качества можно с помощью формулы (9), где  $K = 1,325$  – коэффициент увеличения отношения мощностей сигнала и шума на выходе фотоприёмника (6).

Значение выигрыша  $m$  за счёт очистки полупроводникового материала фотоприёмника зависит от величины  $\rho_{выхфп}^2$  и коэффициента  $K$ .

Кроме квантовой эффективности ФП после очистки от тяжёлых изотопов кристаллов галлия улучшатся и другие харак-

теристики материала. Известно, что очистка от тяжёлых изотопов кремния позволила увеличить быстродействие микропроцессоров более чем в два раза за счёт уменьшения эффективной массы электронов и повышения подвижности носителей заряда [3]. Ещё больший эффект за счёт более подвижных носителей заряда в *AsGa* можно ожидать от арсенида галлия.

## ИЗОТОПИЧЕСКИЕ СВЕРХРЕШЁТКИ

Наиболее перспективным материалом для оптоэлектроники в различных областях техники наряду с МКЯ являются полупроводниковые сверхрешётки (СВР), которые характеризуются расщеплением энергетических уровней и образованием подзон проводимости и щелей в квантовых ямах.

Изменяя изотопический состав материала, например, арсенида галлия, можно выбирать расположение энергетических подзон в квантовых ямах и ширину энергетических щелей в СВР (рис. 1) для проектирования новых полупроводников. Это происходит за счёт изменений эффективной массы электрона  $m_{эф}$  и ширины запрещённой зоны  $E_g$  материала квантовых ям.

Ширина щелей и подзон проводимости определяется исходным материалом, а также шириной барьеров и ям. При проектировании оптоэлектронных приборов, допустим, с фотоэффектом на межподзонных переходах, важно добиться требуемой ширины энергетической щели и количества подзон в квантовой яме. Только одним подбором параметров  $a$  и  $b$  ям для выбранного материала трудно получить желаемый результат.





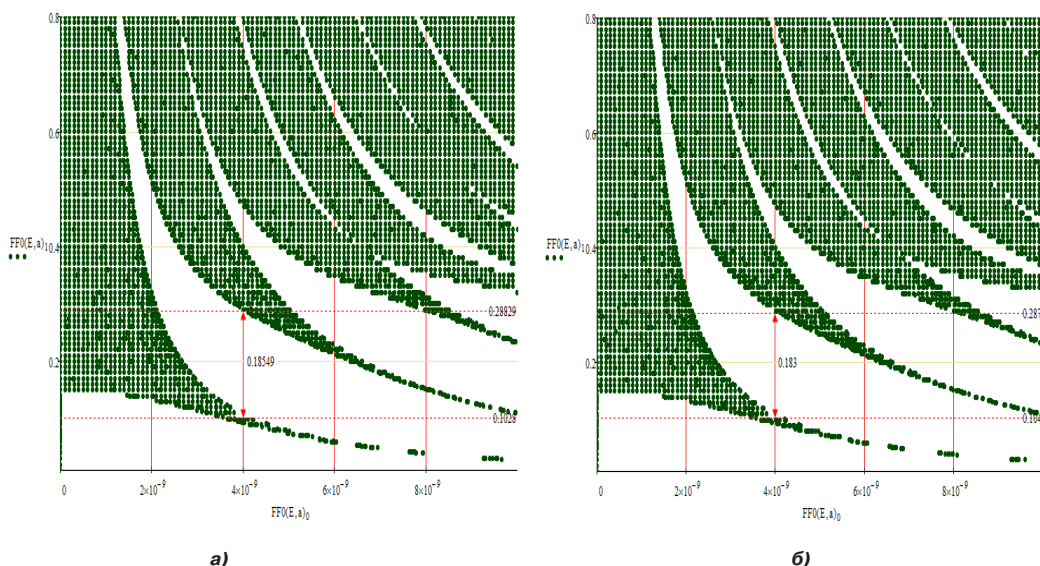


Рис. 3. Зависимости энергетических уровней СВР до и после очистки галлия от тяжёлых изотопов.

С помощью изотопической нанотехнологии модель СВР позволяет создавать новые материалы с заранее заданными оптоэлектронными характеристиками [1].

Как уже отмечалось, тяжёлые изотопы можно рассматривать как дефекты кристаллической решётки, которые значительно влияют на электрические, оптические и механические свойства материала.

Механизм влияния дефектов кристаллической решётки на подвижность электронов можно оценить согласно классической теории электропроводности. Так, равноускоренное движение электрона в кристалле под действием электрического поля заканчивается столкновением с дефектом кристаллической решётки [11]. При этом приобретённая скорость в направлении электрического поля падает практически до нуля, затем опять начинается ускорение электрона. Цикл «ускорение–рассеяние» повторяется снова и много раз. Среднее расстояние, пролетаемое электроном от столкновения до столкновения, называется длиной свободного пробега. Для кристаллов кремния известно, что после очистки от тяжёлых изотопов  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{30}\text{Si}$ , которые составляют примерно 8 % всех атомов, подвижность электронов повысилась в два раза [3].

Для естественного галлия, который состоит из двух изотопов ( $^{69}\text{Ga} - 60,1\%$ ;  $^{71}\text{Ga} - 39,9\%$ ), очистка кристалла от изотопа  $^{71}\text{Ga}$  может повысить подвижность электронов более чем в два раза. С учётом того, что галлий легче кремния (отношение эффективных масс  $m_{\text{эф}}$  для  $\text{Si}$  и  $\text{Ga}$  равно 2,84), можно ожидать большего эффекта от изотопической очистки. Кроме того, количество циклов «ускорение – рассеяние» для галлия будет больше по сравнению с кремнием, а следовательно, и очистка окажется более эффективной. В случае кремния столкновения с тяжёлым изотопом происходят в среднем через каждые девять атомов, для галлия – примерно через каждые два.

Оценку эффекта от очистки от тяжёлых изотопов кристаллов галлия для сверхрешёток можно получить с помощью математического моделирования зависимости энергетических уровней от ширины ямы. Так, значение эффективной массы в результате очистки от тяжёлых изотопов галлия может уменьшиться в два раза, т.е. составить величину  $0,067/(2 \cdot m_0)$ . Значение запрещённой зоны после очистки может уменьшиться на  $0,06$  эВ, т.е. стать  $1,424 - 0,06 = 1,364$  эВ [7].

На рис. 3 представлены результаты математического моделирования распределения энергетических зон для СВР из арсенида галлия и алюмината арсенида галлия

без очистки галлия от тяжёлых изотопов (рис. 3а) и с очисткой (рис. 3б).

Расчёт ширины энергетической щели в квантовой яме для параметров  $a = b = 4 \text{ нм}$  показал, что очистка уменьшает ширину первой энергетической щели на  $3 \text{ мэВ}$ , и это может быть существенным фактором для достижения определённой длинноволновой границы фотоэффекта, например, в системах обеспечения безопасности, приборах обнаружения опасных веществ, оценки качества продуктов и т.д.

Таким образом, на основании математического моделирования доказаны изменения оптоэлектронных характеристик (распределение энергетических зон в структуре СВР) после очистки материала от тяжёлых изотопов галлия. С помощью изотопических СВР можно проектировать новые полупроводниковые материалы для фотоприёмников сверхдлинного инфракрасного диапазона (атмосферное окно с длиной волны света до  $20 \text{ мкм}$ ), которые невозможно создать обычным путём.

## ВЫВОДЫ

Изменение изотопического состава исходного полупроводника влияет на оптоэлектронные характеристики материала (подвижность носителей заряда, ширину запрещённой зоны, квантовую эффективность и т.д.).

При создании изотопических материалов можно повышать или понижать процентное содержание тяжёлых изотопов в веществе. Так, очистка галлия от тяжёлых изотопов (материала арсенида галлия фотоприёмника) увеличивает отношение мощностей сигнала и шума на выходе ФП и уменьшает на несколько порядков вероятность ошибки.

Наиболее перспективным направлением является создание изотопических сверхрешёток (наноструктур нового поколения). На основе ИСВР могут быть получены новые полупроводниковые материалы для эффективных приборов ночного видения (тепловизоры), солнечных батарей, улавливающих тёмные фотоны, систем обеспе-

чения безопасности, медицинского оборудования и т.д.

Кроме того, изотопическая очистка исходного химического элемента от тяжёлых изотопов позволит создавать более чувствительные пиксели фотокамер и более качественные (эффективные) системы видеонаблюдения, фотоприёмники сверхдлинного инфракрасного диапазона.

В результате представленных исследований доказано влияние очистки на оптоэлектронные характеристики объёмного функционального материала и соответственно на ширину энергетических щелей в квантовых структурах (СВР).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Журавлёва Л. М., Плеханов В. Г. Перспективы применения изотопической наноинженерии в телекоммуникационных системах // Успехи наноинженерии: электроника, материалы, структуры / Под ред. Дж. Дэвиса, М. Томпсона. — М.: Техносфера, 2011. — С. 478–491.
2. Плеханов В. Г., Журавлёва Л. М. Изотопическое создание полупроводникового графена // Нанотехника. — 2012. — № 3. — С. 34–38.
3. Press Release (2001) of Isonics Corporation, Golden, Colorado.
4. Журавлёва Л. М., Малых Ал-й Н., Малых Ал-р Н. Наноматериалы и оптоэлектроника в скоростных системах связи // Мир транспорта. — 2016. — № 2. — С. 74–80.
5. Collins A. T., Lawson S. C., Davies G., Kanda H. Indirect energy gap of  $^{13}\text{C}$  diamond // Phys. Rev. Lett. 65, 891 — Published 13 August 1990.
6. Разделение изотопов. [Электронный ресурс]: [http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Разделение\\_изотопов&oldid=62541612](http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Разделение_изотопов&oldid=62541612). Доступ 05.04.2018.
7. Богданова В. А., Давлеткильдеев Н. А., Семиколенова Н. А., Сидоров Е. Н. Эффективная масса электронов в сильно легированном арсениде галлия при упорядочении примесных комплексов // Физика и техника полупроводников. — 2002. — Том 36. — С. 407–411.
8. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника. — М.: Техносфера, 2006. — 588 с.
9. Мартинес-Дуарт Дж. М. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники. — М.: Техносфера, 2007. — 368 с.
10. Журавлёва Л. М., Ивашевский М. Р. и др. Оценка качества передачи сигналов систем интеллектуального видеонаблюдения // Проектирование и технология электронных средств. — 2017. — № 3. — С. 10–15.
11. Верещагин И. К., Кокин С. М., Никитенко В. А. и др. Физика твёрдого тела — М.: Высшая школа, 2001. — 236 с.
12. Журавлёва Л. М., Никулина Ю. А., Лебедева А. К. Перспективы графеновой наноэлектроники // Мир транспорта. — 2016. — № 1. — С. 72–78. ●

Координаты авторов: Журавлёва Л. М. — [zhubov@mail.ru](mailto:zhubov@mail.ru), Ивашевский М. Р. — [misha\\_13@mail.ru](mailto:misha_13@mail.ru), Музафаров И. Ф. — [muz.il@yandex.ru](mailto:muz.il@yandex.ru).

Статья поступила в редакцию 12.01.2018, актуализирована 15.04.2018, принята к публикации 22.04.2018.

