



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-6-59-65>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЯМОЙ ВЕТВИ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДОВ ШОТТКИ С МОП-КАНАВКАМИ

Я.А. СОЛОВЬЁВ

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 4 мая 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Настоящая работа посвящена разработке математической модели прямой ветви вольт-амперной характеристики диодов Шоттки с канавочной структурой металл – окисел – полупроводник (МОП), учитывающей аккумуляцию основных носителей в кремнии около стенок канавок при прямом смещении. Предложенная математическая модель учитывает снижение последовательного сопротивления области дрейфа диода Шоттки при увеличении напряжения на выпрямляющем контакте за счет обогащения электронами кремния около стенок канавок. Проведено сравнение предложенной модели с экспериментальными результатами для диодов Шоттки с канавочной структурой металл – окисел – полупроводник с номинальным обратным напряжением 45,0 В и номинальным прямым током 50,0 А. Показано, что погрешность расчета величины прямого напряжения для новой модели не превышает 1,2 % в диапазоне прямых токов от 20,0 до 50,0 А, что в 4,6–9,7 раз меньше погрешности расчета для классической модели. Полученные результаты могут быть использованы при разработке структуры и топологии диодов Шоттки с канавочной структурой металл – окисел – полупроводник с заданными электрическими параметрами.

Ключевые слова: диод Шоттки, МОП-канавочная структура, вольт-амперная характеристика, моделирование.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Исследования проводились в рамках проекта ГПНИ (№ ГР 20191100). Автор признателен В.А. Пилипенко, А.Н. Петлицкому, О.Э. Сарычеву за помощь при проведении эксперимента и обсуждении полученных результатов.

Для цитирования. Соловьёв Я.А. Моделирование прямой ветви вольт-амперных характеристик диодов Шоттки с МОП-канавками. Доклады БГУИР. 2021; 19(6): 59-65.

SIMULATION OF FORWARD CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS FOR SCHOTTKY DIODES WITH MOS TRENCHES

JAROSLAV A. SOLOVJOV

JSC "INTEGRAL" – "INTEGRAL" holding managing company (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 4 May 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Present work is devoted to the development of a mathematical model for the forward current-voltage characteristic of Schottky diodes with a metal – oxide – semiconductor (MOS) trench structure, which takes into account the accumulation of the main carriers in silicon near the walls of the trenches at a forward bias. The proposed model considers the decrease of the series resistance of the Schottky diode drift region with an increase in the voltage at the rectifying contact due to the enrichment of silicon with electrons near the walls of the trenches. The proposed model is compared with the experimental results for Schottky diodes with a metal – oxide – semiconductor trench structure with a nominal reverse voltage of 45.0 V and a nominal forward current of 50.0 A. It is shown that the error in calculating the direct voltage value for the new model does not exceed 1.2 % in the range of direct currents from 20.0 to 50.0 A, which is 4.6–9.7 times less than the calculation error for the classical model. The results obtained can be used to develop the structure and geometry of Schottky diodes with a metal – oxide – semiconductor trench structure with required electrical parameters.

Keywords: Schottky diode, trench MOS structure, current voltage characteristic, simulation.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

Gratitude. Studies carried out within the framework of SARP project (SR №20191100). Author is grateful to V.A. Pilipenko, A.N. Petlitsky, O.E. Sarychev for assistance in performing the experiment and the result discussion.

For citation. Solovjov J.A. Simulation of forward current-voltage characteristics for Schottky diodes with MOS trenches. Doklady BGUIR. 2021; 19(6): 59-65.

Введение

Диоды Шоттки широко используются в силовой электронике в качестве выпрямителей тока в схемах управления электропитанием, где по сравнению с традиционными диодами на основе *p-n*-переходов они характеризуются меньшим падением прямого напряжения при одинаковой плотности тока и лучшим быстродействием, обусловленным отсутствием неосновных носителей [1]. Диод Шоттки с МОП (металл – окисел – полупроводник) канавками представляет собой полупроводниковый прибор на основе выпрямляющего контакта металл – полупроводник, у которого под металлизацией анода расположена совокупность целевидных канавок, представляющих собой МОП-структуру, затвор которой электрически соединен с металлизацией анода [2]. В настоящее время диоды Шоттки с МОП-канавками являются одними из наиболее востребованных на рынке электронной компонентной базы силовой электроники, поскольку обеспечивают наилучшее сочетание между требованиями к электрическим параметрам при прямом и обратном включении [3, 4].

В отличие от классической структуры силового диода Шоттки с охранным кольцом электрические параметры диодов Шоттки с МОП-канавками определяются не только контактно-барьерными свойствами металлизации анода, но и конструктивно-топологическими параметрами структуры, что усложняет поиск оптимальных решений при создании структур тренч-МОП диодов Шоттки с заданными электрическими параметрами [5]. Классическая математическая модель прямой ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) диодов Шоттки с МОП-канавками не является достаточно точной, поскольку не учитывает аккумуляцию основных носителей в кремнии вдоль стенок канавок при прямом смещении, а проведение более точных расчетов

требует специализированное программное обеспечение для приборно-технологического моделирования [6].

Целью данной работы является разработка математической модели прямой ветви ВАХ диодов Шоттки с МОП-канавками, учитывающей аккумуляцию основных носителей в кремнии около стенок канавок при прямом смещении.

Постановка задачи

Поскольку диод Шоттки с МОП-канавками представляет собой периодическую структуру, то моделирование его ВАХ проводят в приближении одномерной модели для фрагмента структуры, содержащего один период единичной длины [6] (рис. 1, а). В предлагаемой модели учитывается формирование в кремнии области аккумуляции вдоль границы SiO₂/Si МОП-канавок за счет прикладываемого к слою поликристаллического кремния (ПКК) положительного потенциала при прямом смещении.

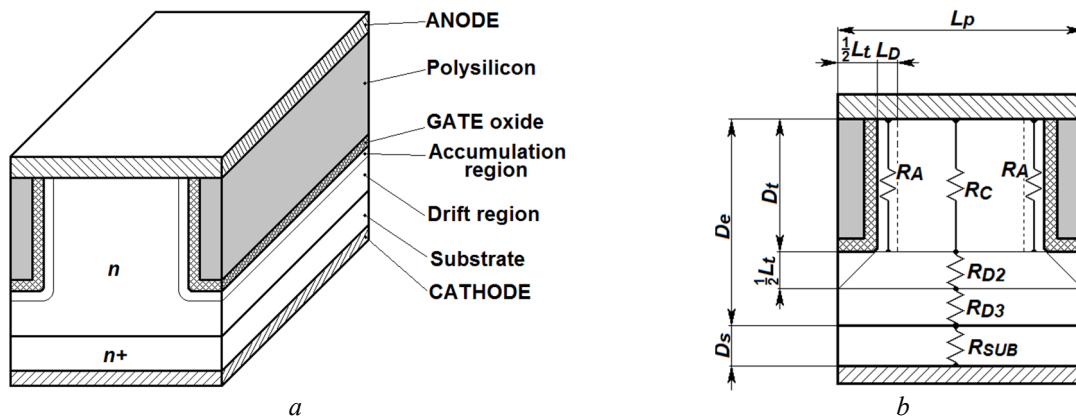


Рис. 1. Диод Шоттки с МОП-канавками при прямом смещении:
а – фрагмент периодической структуры; б – одномерная модель
Fig. 1. Trench MOS Schottky diode under forward bias condition:
а – fragment of the regular structure; б – one dimensional model

Классический подход к моделированию прямой ветви ВАХ диода Шоттки с МОП-канавками заключается в рассмотрении суммы двух составляющих прямого напряжения [7]:

$$V_F(I_F) = V_{SD}(I_F) + I_F R_{SER}, \quad (1)$$

где V_F – приложенное к структуре диода прямое напряжение, В; I_F – протекающий через структуру прямой ток, А; V_{SD} – напряжение, прикладываемое непосредственно к выпрямляющему контакту, В; R_{SER} – последовательное сопротивление диодной структуры, Ом, приводящее к дополнительному падению напряжения V_{SER} , В.

В свою очередь, величина R_{SER} определяется суммой (рис. 1, б) [7]

$$R_{SER} = R_{D1} + R_{D2} + R_{D3} + R_{SUB}, \quad (2)$$

где R_{D1} – сопротивление области дрейфа между канавками, Ом; R_{D2} – сопротивление участков области дрейфа при переходе от пространства между канавками к сплошному слою, Ом; R_{D3} – сопротивления сплошного слоя области дрейфа, граничащего с подложкой, Ом; R_{SUB} – сопротивление подложки, Ом.

При формировании в кремнии области аккумуляции вдоль стенок канавок формируются участки с меньшим, чем в остальной части области дрейфа, удельным сопротивлением R_A (Ом) (рис. 1, б), которые шунтируют сопротивление R_{D1} и уменьшают в целом величину R_{SER} . Для учета данного факта в математической модели прямой ветви ВАХ диода Шоттки с МОП-канавками целесообразно в качестве аргумента функции использовать параметр V_{SD} , для чего выражение (1) приведем к следующему виду:

$$V_F(V_{SD}) = V_{SD} + I_F(V_{SD}) R_{SER}(V_{SD}). \quad (3)$$

Таким образом, для построения математической модели прямой ветви ВАХ диода Шоттки с МОП-канавками, учитывающей формирование в кремнии областей аккумуляции вдоль стенок канавок, необходимо решить следующие задачи по установлению зависимостей:

- концентрации основных носителей в области аккумуляции от приложенного к выпрямляющему контакту напряжения V_{SD} ;
- прямого тока I_F от приложенного к выпрямляющему контакту напряжения V_{SD} ;
- последовательного сопротивления R_{SER} от приложенного к выпрямляющему контакту напряжения V_{SD} .

Построение математической модели

1. *Зависимость концентрации основных носителей в области аккумуляции.* Известно, что глубина области аккумуляции равна длине Дебая в полупроводнике, численное значение которой определяется из выражения [8]

$$L_D = \sqrt{\frac{kT\epsilon_s\epsilon_0}{N_D q^2}}, \quad (4)$$

где k – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹; T – абсолютная температура, К; ϵ_s – диэлектрическая проницаемость кремния, равная 11,9; ϵ_0 – электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-14}$ Ф·см⁻¹; N_D – концентрация доноров в области дрейфа; q – заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Дополнительная концентрация носителей в области аккумуляции (см⁻³) определяется выражением [8]

$$\Delta n = \sqrt{2} N_D \left(e^{\frac{q\psi_s}{2kT}} - 1 \right), \quad (5)$$

где ψ_s – поверхностный потенциал на границе SiO₂/Si, В. Его величина, в свою очередь, зависит от приложенного к МОП-структуре ПКК/SiO₂/Si напряжения, которое будем считать численно равным напряжению, приложенному к выпрямляющему контакту металл – кремний V_{SD} , В.

Зависимость параметра ψ_s от величины V_{SD} можно установить из следующих рассуждений. Приложенное к МОП-структуре напряжение распределяется между слоем SiO₂ и областью аккумуляции в соответствии с выражением [8]

$$V_{SD} = V_{OX} + \psi_s = E_{OX} d_{OX} + \frac{1}{2} E_{Si} L_D, \quad (6)$$

где V_{OX} – напряжение, приложенное к слою SiO₂, В; E_{OX} – напряженность электрического поля в слое SiO₂, В; d_{OX} – толщина слоя SiO₂, см; E_{Si} – напряженность электрического поля на границе SiO₂/Si, В·см⁻¹. С другой стороны, в соответствии с законом Гаусса напряженности электрических полей в слое SiO₂ и на границе SiO₂/Si соотносятся пропорционально диэлектрическим постоянным SiO₂ и кремния [7]:

$$E_{OX} = \frac{\epsilon_{Si}}{\epsilon_{OX}} E_{Si}, \quad (7)$$

где ϵ_{OX} – диэлектрическая проницаемость SiO₂, равная 3,89.

Подстановка выражения (7) в выражение (6) с последующим его решением относительно ψ_s дает следующий результат:

$$\psi_s = \frac{V_{SD} L_D}{2 \left(1 + \frac{\epsilon_{Si} d_{OX}}{\epsilon_{OX}} \right)}. \quad (8)$$

Таким образом, концентрация носителей N_{Da} , (см⁻³) в области аккумуляции будет определяться как сумма концентрации доноров в области дрейфа и дополнительной концентрации носителей с учетом выражений (5) и (8):

$$N_{Da} = N_D \left(1 + \sqrt{2} \left(e^{\frac{qV_{SD}}{4kT \left(1 + \frac{\epsilon_S d_{OX}}{\epsilon_{OX}} \right)}} - 1 \right) \right). \quad (9)$$

2. *Зависимость прямого тока от напряжения на выпрямляющем контакте.* Величину прямого тока, протекающего через диодную структуру, определяли из выражения для ВАХ при прямом смещении [8]:

$$I_F = \frac{S_K (L_p - L_t)}{L_p} A T^2 e^{\left(\frac{q(V_{SD} - \phi_B)}{kT} \right)}, \quad (10)$$

где S_K – площадь контакта металлизации анода в структуре диода Шоттки с МОП-канавками, см²; L_p – ширина шага диодной структуры, см; L_t – ширина МОП-канавки, см; A – эффективная постоянная Ричардсона, равная 112 А·см⁻²; ϕ_B – высота барьера Шоттки контакта металл – кремний, В.

3. *Зависимость последовательного сопротивления.* Для упрощения расчета составляющих величины последовательного сопротивления R_{D1} , R_{D2} , R_{D3} и R_{SUB} воспользуемся одномерной моделью для одного периода структуры единичной длины (рис. 1, а, б). В таком случае вклад в удельное сопротивление одной ячейки области дрейфа между соседними канавками R_{D1}^* (Ом·см) будет определяться сопротивлением центральной области R_C и сопротивлением двух областей аккумуляции R_A (рис. 1, б):

$$R_{D1}^* = \frac{D_t}{q\mu \left[N_D (L_p - L_t - 2L_D) + 2N_{Da} L_D \right]}, \quad (11)$$

где D_t – глубина МОП-канавки, см; μ – подвижность электронов в кремнии, равная 1500 см²·В⁻¹·с⁻¹.

Вклад в удельное сопротивление ячейки области дрейфа при переходе от пространства между канавками к сплошному слою R_{D2}^* (Ом·см) (рис. 1, б) определяется выражением [7]

$$R_{D2}^* = \frac{1}{2q\mu N_D} \ln \left(\frac{L_p}{L_p - L_t} \right). \quad (12)$$

Вклад в удельное сопротивление сплошного слоя области дрейфа, граничащего с подложкой R_{D3}^* (Ом·см) (рис. 1, б) определяется выражением [7]

$$R_{D3}^* = \frac{D_e - D_t - \frac{1}{2} L_t}{q\mu N_D L_p}, \quad (13)$$

где D_e – полная толщина области дрейфа, см.

И, наконец, для вклада в удельное сопротивление ячейки сопротивления подложки R_{SUB}^* (Ом·см) (рис. 1, б) справедливо выражение

$$R_{SUB}^* = \rho_{SUB} \frac{D_S}{L_p}, \quad (14)$$

где ρ_{SUB} – удельное сопротивление кремниевой подложки, Ом·см; D_S – толщина кремниевой подложки, см.

Таким образом, величина последовательного сопротивления области диода Шоттки с МОП-канавками будет определяться следующим выражением:

$$R_{SER} = \frac{L_p}{S_K} (R_{D1}^* + R_{D2}^* + R_{D3}^* + R_{SUB}^*). \quad (15)$$

Результаты и их обсуждение

Расчеты прямой ВАХ согласно предложенной и классической модели проводили для диодов Шоттки с МОП-канавками (рис. 2) с номинальным обратным напряжением 45 В и номинальным прямым током 50 А. Параметры структуры, использованные для расчета, приведены в табл. 1.

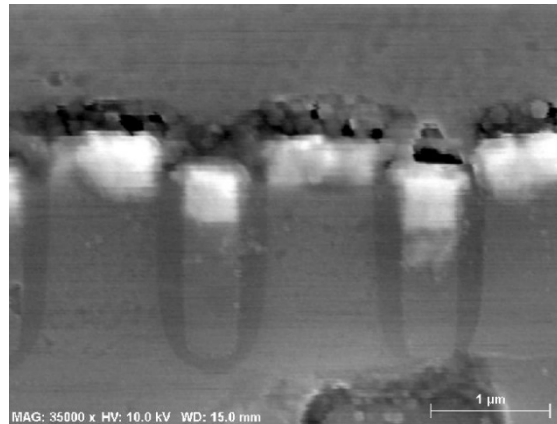


Рис. 2. РЭМ фото фрагмента структуры диода Шоттки с МОП-канавками
Fig. 2. SEM image of trench MOS Schottky diode structure fragment

Таблица 1. Параметры структуры диода Шоттки с МОП-канавками
Table 1. Structure parameters of trench MOS Schottky diode

| Параметр Parameter | N_D | φ_B | d_{OX} | S_K | L_P | L_t | D_t | D_e | D_s | ρ_s | α |
|-----------------------|--------------------------------------|-------------|------------------|--------------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Единица Unit | Cm^{-3} Cm^{-3} | В V | см cm | cm^2 cm^2 | см cm | см cm | см cm | см cm | см cm | Ом·см Ohm·cm | см cm |
| Значение Value | $1,1 \cdot 10^{16}$ | 0,687 | $1,8 \cdot 10^5$ | $9,6 \cdot 10^{-2}$ | $1,45 \cdot 10^{-4}$ | $7,0 \cdot 10^{-5}$ | $1,4 \cdot 10^{-4}$ | $3,5 \cdot 10^{-4}$ | $3,2 \cdot 10^{-2}$ | $5,0 \cdot 10^{-3}$ | $2,0 \cdot 10^{-8}$ |

Сравнительный анализ результатов моделирования (рис. 3) показывает, что при величине прямого тока вплоть до 5,0 А обе модели предсказывают величину прямого тока с погрешностью менее 1,0 %. В диапазоне прямых токов от 5,0 до 50,0 А погрешность расчета прямого напряжения для классической модели возрастает до 8,8 %. В то же время для предложенной модели, учитывающей снижение последовательного сопротивления при увеличении напряжения на выпрямляющем контакте за счет аккумуляции электронов в кремнии вдоль стенок канавок, погрешность расчета не превышает 1,2 %. Причем при величине прямого тока от 25,0 до 50,0 А точность новой модели вырастает в 4,6–9,7 раз, что сопоставимо с результатами приборно-технологического моделирования [6].

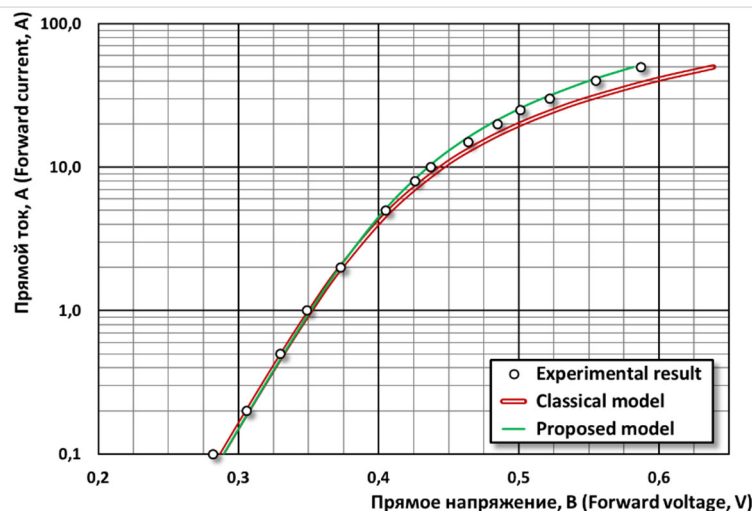


Рис. 3. Результаты моделирования прямой ВАХ диода Шоттки с МОП-канавками
Fig. 3. Simulation result of forward current-voltage characteristics for trench MOS Schottky diode

Заключение

Предложена математическая модель прямой ветви вольт-амперной характеристики диода Шоттки с МОП-канавками, которая учитывает снижение последовательного сопротивления области дрейфа при увеличении напряжения на выпрямляющем контакте за счет аккумуляции электронов кремнии вдоль стенок канавок. Проведено сравнение предложенной модели с экспериментальными результатами для диодов Шоттки с МОП-канавками с номинальным обратным напряжением 45,0 В и номинальным прямым током 50,0 А. Показано, что погрешность расчета величины прямого напряжения для новой модели не превышает 1,2 %, что в диапазоне прямых токов от 20,0 до 50,0 А в 4,6–9,7 раз меньше погрешности классической модели. Полученные результаты могут быть использованы при разработке структуры и топологии диодов Шоттки с МОП-канавками с заданными электрическими параметрами.

Список литературы

1. Белоус А.И., Солодуха В.А., Ефименко С.А., Пилипенко В.А. *Основы силовой электроники*. Москва: Техносфера; 2019.
2. Baliga V.J. *Fundamentals of power semiconductor devices*. Springer Science+Business Media; 2008.
3. Голубев Н., Токарев В., Шпаковский С. Применение субмикронной технологии – путь к созданию высокоэффективных диодов Шоттки. *Силовая электроника*. 2005;4:4-7.
4. Ланин В., Соловьёв Я., Керенцев А. Конструктивно-технологическая оптимизация параметров диодов Шоттки. *Силовая электроника*. 2011; 1: 12–17.
5. Котов В.С., Голубев Н.Ф., Борисенко В.Е. Конструктивно-технологическое усовершенствование диодов Шоттки с МОП канавочной структурой. *Доклады БГУИР*. 2013;5(75):12-16.
6. Котов В.С., Голубев Н.Ф., Токарев В.В., Борисенко В.Е. Моделирование диодов Шоттки с МОП канавочной структурой. *Практическая силовая электроника*. 2013;3(51):48-53.
7. Baliga V.J. *Advanced power rectifier concepts*. Springer Science+Business Media; 2009.
8. Зи С.М. *Физика полупроводниковых приборов*. Москва: Мир; 1984.

References

1. Belous A.I., Solodukha V.A., Efimenko S.A., Pilipenko V.A. [*Fundamentals of power electronics*]. Moscow: Technosphaera; 2019. (In Russ.)
2. Baliga V.J. *Fundamentals of power semiconductor devices*. Springer Science+Business Media; 2008.
3. Golubev N., Tokarev V., Shpakovsky S. [Application of submicron technology – the way to create high-performance Schottky diodes]. *Silovaya elektronika = Power electronics*. 2005;4:4-7. (In Russ.)
4. Lanin V., Solovjov J., Kerentsev A. [Structure and technological optimization of Schottky diodes parameters]. *Power electronics*. 2011; 1: 12–17. (In Russ.)
5. Kotov V.S., Golubev N.F., Borisenko V.E. [Structure and technological improvements of TMBS diodes]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2013;5(75):12-16. (In Russ.)
6. Kotov V.S., Golubev N.F., Tokarev V.V., Borisenko V.E. [Trench MOS barrier Schottky diode simulation]. *Prakticheskaya silovaya elektronika = Practical power electronics*. 2013; 3(51): 48-53. (In Russ.)
7. Baliga V.J. *Advanced power rectifier concepts*. Springer Science+Business Media; 2009.
8. Sze S.M. [*Physics of semiconductor devices*]. Moscow: Mir; 1984. (In Russ.)

Сведения об авторах

Соловьёв Я.А., к.т.н., доцент, заместитель директора Филиала «Транзистор», ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

Information about the authors

Solovjov J.A., Associate Professor, Deputy Director of “Transistor” Branch, JSC “INTEGRAL” – “Integral” holding managing company.

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Корженевского, 16,
Филиал «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ»
тел. +375-17-212-21-21;
е-mail: jsolovjov@integral.by
Соловьёв Ярослав Александрович

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Korzhenevskogo str., 16,
“Transistor” Branch of JSC “INTEGRAL”
tel. +375-17-212-21-21;
е-mail: jsolovjov@integral.by
Solovjov Jaroslav Aleksandrovich