

УДК 620.191.:621.373.820

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ФОРМИРОВАНИЯ СИЛИЦИДА ПЛАТИНЫ МЕТОДОМ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ПАРАМЕТРЫ ДИОДОВ ШОТТКИ

В.А. СОЛОДУХА, В.А. ПИЛИПЕНКО, В.А. ГОРУШКО, В.А. ФИЛИПЕНЯ

*Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ» –
управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Республика Беларусь*

Поступила в редакцию 7 декабря 2018

Аннотация. Приведены результаты исследования влияния режимов формирования силицида платины с применением быстрой термической обработки на электрофизические параметры диодов Шоттки. Показано, что данная обработка, по сравнению с традиционной, позволяет за счет уменьшения микрорельефа границы раздела PtSi–Si, а также получения в результате обработки менее дефектной и равновесной структуры барьерного слоя повысить высоту барьера с 0,804 до 0,825 В, снизить ток утечки с $-4,42 \cdot 10^{-6}$ до $-2,85 \cdot 10^{-6}$ А и в 1,25 раза повысить надежность диодов Шоттки при температуре эксплуатации 125 °С.

Ключевые слова: диод Шоттки, быстрая термообработка, силицид платины, высота барьера, ток утечки.

Abstract. The results of studying of the impact of formation modes of platinum silicide using quick heat treatment on electrophysical parameters of Schottky diodes are presented. It is shown that this treatment, as compared to the traditional one, allows at the cost of reducing of microrelief of boundary of PtSi–Si, and also obtaining as a result of treatment a less defective and equilibrium structure of the barrier layer, to raise barrier height from 0,804 to 0,825 V, to reduce leakage current from $-4,42 \cdot 10^{-6}$ to $-2,85 \cdot 10^{-6}$ A and in 1,25 times and to raise the reliability of Schottky diodes at operating temperature 125 °C.

Key words: Schottky diode, quick heat treatment, platinum silicide, barrier height, leakage current.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 119, No. 1, pp. 62-66

**The impact of formation modes of platinum silicide
by the quick heat treatment on Schottky diodes parameters**

V.A. Saladukha, V.A. Pilipenko, V.A. Gorushko, V.A. Philippenya

Введение

Одним из перспективных классов дискретных полупроводниковых приборов элементной базы силовой электроники являются диоды Шоттки, основанные на использовании свойств выпрямляющего контакта металл-полупроводник. Благодаря таким фундаментальным преимуществам над диодами на основе *p-n* переходов, как отсутствие в их структуре неосновных носителей заряда, а также весьма малое прямое падение напряжения при одинаковой плотности тока, они нашли широкое применение в полупроводниковой технике в качестве ограничительных элементов, препятствующих насыщению тока транзисторов, и дискретных элементов логических и запоминающих матриц. Основным недостатком диодов Шоттки является зависимость их электрических характеристик от состояния границы раздела металл-полупроводник. Для формирования диодов Шоттки с заданными электрофизическими параметрами необходимо определить режимы формирования и топологию диодной структуры, а также обеспечить необходимую величину барьера Шоттки. Использование чистых металлов в качестве материала барьера Шоттки

приводит к дополнительным утечкам в связи с наличием на границе раздела промежуточного слоя с высокой плотностью поверхностных состояний [1]. Кроме того, некоторые металлы склонны к взаимодействию с поверхностью полупроводника с образованием химических соединений либо твердых растворов, что приводит к нестабильности электрофизических параметров диодов Шоттки [2, 3].

В настоящее время в качестве барьера Шоттки широкое распространение получили силициды различных металлов [4]. К преимуществам силицидов относят их лучшую химическую стойкость. Кроме того, они могут быть получены путем твердофазной реакции металла с кремнием при отжиге металлических пленок, нанесенных на его поверхность, обеспечивая лучшую чистоту границы раздела. Применение высоких температур в данном случае приводит к существенному изменению микрорельефа границы раздела силицид–кремний. При этом, чем выше температура и длительность обработки, тем более развитым формируется микрорельеф границы раздела, что вызывает значительное увеличение тока утечки диодов Шоттки [5, 6]. Это привело к поиску альтернативных путей реализации диффузионного синтеза силицидов за счет значительного снижения времени без существенного изменения температуры его проведения. Такой подход может быть реализован при использовании быстрой термической обработки, обеспечивающей высокие скорости нагрева, и сохранении эффективности длительной термической обработки [7–9].

Цель настоящей работы – исследование влияния формирования силицида платины методом быстрой термообработки на параметры диодов Шоттки.

Объекты и методика эксперимента

Для формирования барьерных слоев использовали силицидные структуры платины. Пленки платины толщиной 40 нм наносились на подложку монокристаллического кремния КЭФ 0,5 (111) путем магнетронного распыления мишени из платины с чистотой 99,93 % на установке «MRC 603» с криогенной откачкой до давления не хуже $5 \cdot 10^{-5}$ Па. В качестве рабочей среды использовался аргон, чистота которого составляла 99,993 %. Для протекания реакции твердофазного синтеза между металлом и кремнием проводился стационарный отжиг в диффузионной системе СДОМ 3/100 в одну или две стадии в кварцевом реакторе с холодным краем. Температура и время составляли для первой стадии 350 °С и 180 мин, а для второй стадии, а также одностадийного отжига – 550 °С и 30 мин. Указанные термообработки осуществляли в среде осушенного азота марки А [10].

Быстрая термическая обработка (БТО) проводилась в режиме теплового баланса путем облучения нерабочей стороны пластины некогерентным световым потоком в атмосфере азота в течение 7 с при температурах 200–550 °С. Источником излучения в установке служили кварцевые галогенные лампы накаливания. Контроль температуры осуществлялся термомпарным методом, обеспечивающим измерение реальной температуры образца при БТО с точностью $\pm 0,5$ °С. Снятие не прореагировавших остатков платины осуществлялось в царской водке при температуре 75 °С в течение 5 мин.

Высоту барьера Шоттки и ток утечки определяли методом ВАХ в соответствии с выражением [3] $\phi_{\text{во}} = (kT/q) \ln A^{**} T^2 / I_s$, где I_s – ток насыщения, величину которого определяли путем экстраполяции начального участка прямой ветви ВАХ к $V = 0$; A^{**} – постоянная Ричардсона; T – абсолютная температура; q – заряд электрона; k – постоянная Больцмана. Погрешность в определении высоты барьера Шоттки составляла $\pm 0,005$ эВ.

Измерения ВАХ проводились на комплексе прецизионных измерений характеристик элементной базы ИМС В1500 ф. Agilent (США) с зондовой станцией Summit 11000 AP ф. Cascade. Исследования морфологии поверхности пленок силицида платины, а также границы его раздела с кремнием проводились на растровом электронном микроскопе S-4800 ф. Hitachi (Япония) с разрешением 1 нм.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты сравнительного анализа величины барьера Шоттки, сформированного с использованием длительной и быстрой термической обработки, и его тока утечки приведены в табл. 1.

Таблица 1. Контактные свойства барьеров PtSi на кремнии, полученных при различных видах и режимах термообработки

Вид обработки	Режим обработки	Высота барьера, В	Обратный ток, А (V _R = 45 В)
Одностадийная ДТО	T = 550 °С, 30 мин в среде N ₂	0,804	-6,58·10 ⁻⁶
Двухстадийная ДТО	1 стадия T = 350 °С, 180 мин 2 стадия T = 550 °С, 30 мин в среде N ₂	0,804	-3,77·10 ⁻⁶
БТО	T = 400 °С, 7 с в среде N ₂	0,793	-5,00·10 ⁻²
БТО	T = 450 °С, 7 с в среде N ₂	0,803	-1,27·10 ⁻²
БТО	T = 500 °С, 7 с в среде N ₂	0,804	-3,83·10 ⁻³
БТО	T = 550 °С, 7 с в среде N ₂	0,825	-2,57·10 ⁻⁶

Из табл. 1 следует, что проведение БТО системы Pt–Si при температуре 400 °С приводит к образованию барьера высотой 0,793 В, имеющего ток утечки $-5,00 \cdot 10^{-2}$ А. При длительной термообработке как в одностадийном, так и в двухстадийном режиме высота барьера значительно выше и составляет 0,804 В, а ток утечки для одностадийного отжига $-6,58 \cdot 10^{-6}$ А, а двухстадийного $-3,77 \cdot 10^{-6}$ А. Такое различие данных параметров обусловлено тем, что при данной температуре БТО формируется барьерный слой, содержащий две фазы силицида платины – PtSi и Pt₂Si, каждая из которых имеет определенную высоту барьера. По литературным данным, для фазы Pt₂Si ее величина составляет 0,78 В, что значительно ниже, чем для фазы PtSi [4]. Таким образом, высота барьера, имеющего две фазы силицида платины ниже, чем для однофазного барьера на основе PtSi. Следует отметить, что при данной температуре БТО кристаллическая решетка такой двухфазной системы имеет значительную дефектность и является термодинамически неустойчивой, что приводит как к уменьшению высоты барьера, так и росту его тока утечки.

Повышение температуры БТО до 450 °С приводит к росту высоты барьера Шоттки до величины 0,803 В и уменьшению его тока утечки до $-1,27 \cdot 10^{-2}$ А. Однако величина тока утечки значительно превышает данную величину барьерного слоя, изготовленного по традиционной технологии с использованием длительной термообработки для формирования PtSi. Это указывает на то, что при температуре БТО 450 °С формируется барьерный слой, содержащий лишь одну фазу силицида платины – PtSi, но имеющий по-прежнему высокую дефектность и термодинамически неустойчивую структуру, которая способствует увеличению тока утечки. Дальнейшее повышение температуры БТО до 500 °С позволяет незначительно увеличить значение высоты барьера до 0,804 В и снизить его ток утечки до $-3,83 \cdot 10^{-3}$ А. И только БТО при температуре 550 °С приводит к росту высоты барьера до 0,825 В и резкому уменьшению тока его утечки до $-2,57 \cdot 10^{-6}$ А.

Как отмечалось ранее, электрические характеристики диодов Шоттки во многом зависят от состояния границы раздела металл–полупроводник. В связи с этим проводилось исследование состояния границы раздела кремний–силицид платины в зависимости от режимов формирования силицида и ее влияние на электрические параметры барьера. Из рис. 1, где приведены сколы структуры Pt–Si после быстрой и длительной термообработок, видно, что микрорельеф границы раздела при БТО 550 °С менее развит (рис. 1, а), чем в случае длительной термообработки (рис. 1, б, в), где имеют место углубления в кремнии, вершины которых в 3–4 раза больше, чем при БТО. Такие углубления являются местами пробоя в контакте и причинами увеличенного обратного тока, поскольку на их вершинах электрическое поле максимально. При этом, чем глубже и острее вершина, тем выше электрическое поле, а следовательно, выше его ток утечки. Кроме того, наличие такого микрорельефа на границе раздела силицид–кремний приводит к увеличению электрически активной площади контакта, что, в свою очередь, вызывает увеличение тока утечки. В случае БТО при твердофазном синтезе PtSi острые вершины в Si практически отсутствуют, что и обуславливает уменьшение токов утечки и повышение величины барьера Шоттки.

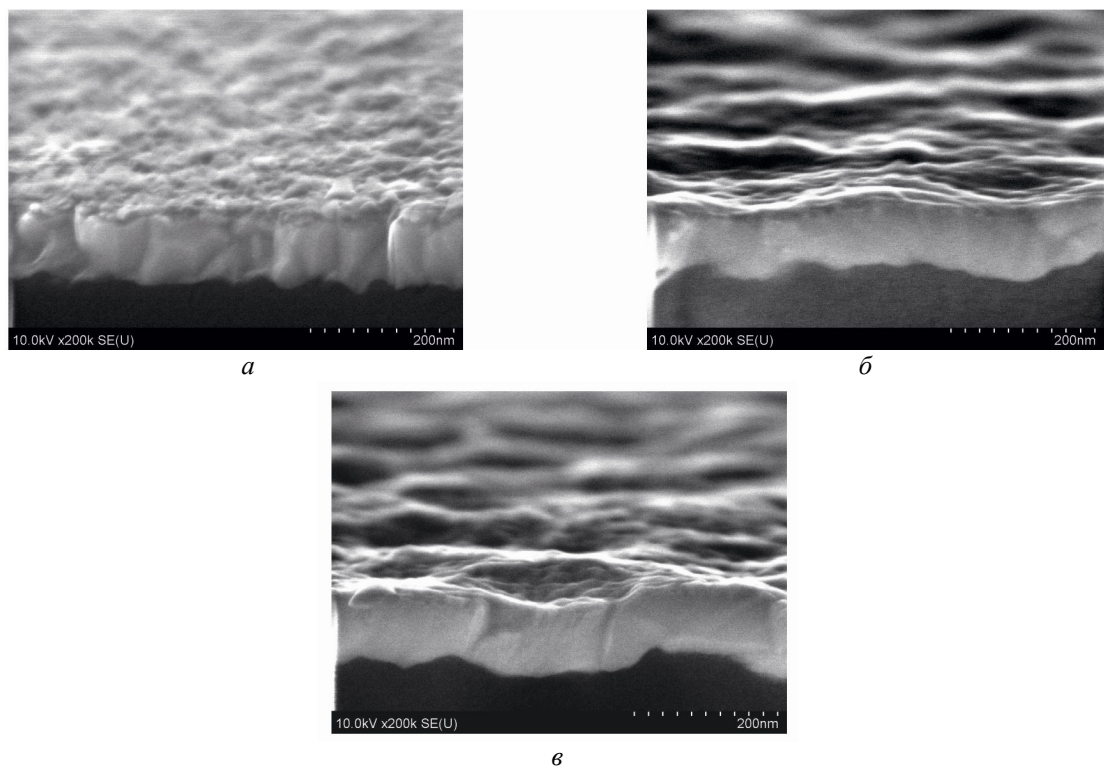


Рис. 1. Сколы структуры Pt–Si после: *a* – БТО при 550 °С, 7 с; *б* – длительной термообработки при 350 °С, 180 мин + 550 °С, 30 мин; *в* – длительной термообработки при 550 °С, 30 мин

Другим фактором, влияющим на ток утечки через барьерный слой на основе силицида платины, является совершенство его микроструктуры. Наличие в слое структурных дефектов и низкое ее термодинамическое равновесие вызывает не только уменьшение высоты барьера, как показано выше, но и увеличивает ток утечки через такой барьерный слой. При этом, чем выше это несовершенство, тем выше ток утечки. Это означает, что одним из условий получения низкого тока утечки через барьерный слой является улучшение структуры силицида платины. Как видно из результатов исследований (рис. 2), применение БТО при температуре 550 °С позволяет в отличие от длительных термообработок получить структуру силицида платины, имеющую меньшие размеры зерен. Такая структура является менее дефектной и более равновесной, а также термодинамически устойчивой, следовательно, ток утечки через нее будет ниже. Следует отметить, что формирование такой структуры при БТО происходит при температуре не ниже 550 °С, т. е. носит пороговый характер, аналогичный отжигу слоев кремния, аморфизированных в процессе ионного легирования, когда процесс твердофазной рекристаллизации идет за счет отжига структурных дефектов. Это означает, что в случае формирования силицида платины методом БТО при температуре 550 °С образуется малодефектная и равновесная структура, обеспечивающая резкое уменьшение тока утечки.

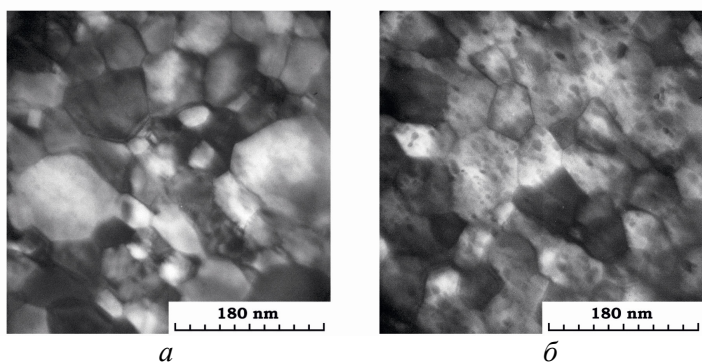


Рис. 2. Светлопольные ПЭМ-фотографии пленки PtSi на кремнии сформированной методом: *a* – длительной термообработки пленки Pt на Si при 550 °С в течение 30 мин; *б* – быстрой термообработки при 550 °С в течение 7 с

На основании проведенных исследований была изготовлена диодная сборка КДШ2932 с общим катодом, состоящая из двух кремниевых эпитаксиально-планарных диодов с барьером Шоттки, выполненная в пластмассовых корпусах. Анализ ВАХ данных приборов (рис. 3, табл. 2) показывает, что ток утечки диодов Шоттки, изготовленных с применением БТО для формирования силицида платины, в 1,57 раза ниже, чем на приборах, полученных по традиционной технологии с применением длительной термообработки. При этом в первом случае высота барьера составляет 0,825 В, а во втором – 0,804 В. Такое увеличение высоты барьера и уменьшение токов утечки обусловлены причинами, описанными выше.

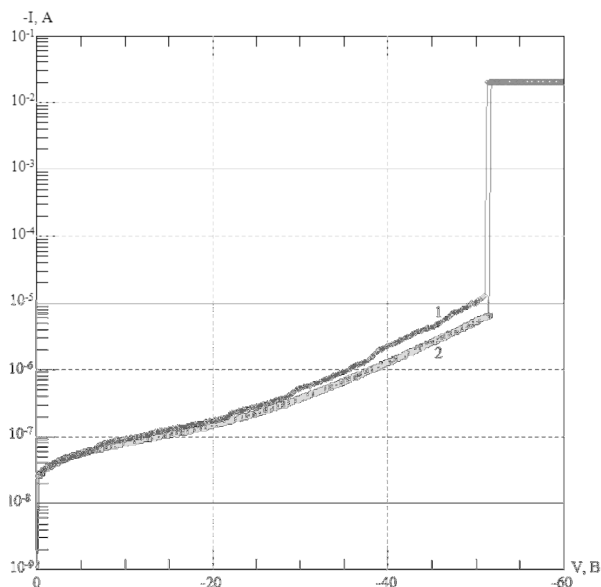


Рис. 3. Вольтамперные характеристики диодных сборок КДШ2932, изготовленных:
 1 – по традиционной технологии (I стадия 350 °С 180 мин + II стадия $T = 550$ °С, $t = 30$ мин);
 2 – с применением БТО ($T = 550$ °С, $\tau = 7$ с)

Важным параметром, определяющим надежность диодов Шоттки, является поведение тока утечки в температурном диапазоне от -25 до $+125$ °С. Анализ его величины проводился при обратном смещении -45 В для диодов, изготовленных как по стандартному процессу формирования силицида платины, так и с применением БТО. В обоих случаях с повышением температуры наблюдается рост тока утечки. Так, при -25 °С для традиционного процесса он составляет $-4,15 \cdot 10^{-6}$ А, а при использовании БТО – $-3,89 \cdot 10^{-6}$ А. Дальнейшее увеличение температуры до 27 °С приводит к незначительному его росту в первом случае до $-5,12 \cdot 10^{-6}$ А, а во втором – до $-4,82 \cdot 10^{-6}$ А. Иная картина наблюдается при температуре испытаний 75 °С, при которой в случае длительной термообработки величина тока утечки составляет $-4,05 \cdot 10^{-5}$ А, а в случае быстрой термообработки – $-3,79 \cdot 10^{-5}$ А, т. е. в обоих случаях имеет место увеличение тока утечки в 10 раз. Повышение температуры испытаний до 125 °С приводит к дальнейшему росту тока утечки, который в первом случае достигает величины $-100,7 \cdot 10^{-5}$ А, а во втором – $-80,3 \cdot 10^{-5}$ А, что на два порядка выше по сравнению с комнатной температурой. Учитывая, что при температуре 125 °С величина тока утечки, согласно паспортным данным на изделие КДШ2932, не должна превышать $25 \cdot 10^{-3}$ А, то в обоих случаях данная величина более чем на два порядка ниже. При этом запас надежности в случае формирования силицида платины методом БТО в 1,25 раза выше, чем при стандартной технологии.

Таблица 2. Электрические характеристики диодных сборок КДШ2932, изготовленных по стандартной технологии и с применением БТО

Параметры	Тип технологического процесса	
	стандартный	с БТО
Ток утечки затвора, А (обратное смещение -45 В)	$4,48 \cdot 10^{-6}$	$2,85 \cdot 10^{-6}$
Высота барьера Шоттки, В	0,804	0,825

Заклучение

Использование в технологическом процессе создания диодов Шоттки быстрой термической обработки для формирования барьера на основе силицида платины позволяет, по сравнению с традиционным методом, повысить его высоту с 804 до 0,825 В, снизить ток утечки с $(-6,58...-3,77) \cdot 10^{-6}$ А до $-2,57 \cdot 10^{-6}$ А и в 1,25 раза повысить их надежность при температуре эксплуатации 125°C за счет уменьшения микрорельефа границы раздела PtSi-Si, а также получения менее дефектной и равновесной структуры барьерного слоя силицида платины.

Список литературы / References

1. Roderick E.Kh. Metal-semiconductor contacts. M.: Radio and communication, 1982. 216 p.
2. Strikha V.I., Buzaneva E.V. Physical basis of the reliability of metal-semiconductor contacts in integrated electronics. M.: Radion and communication, 1987. 256 p.
3. VLSI Technology / Ed. by S.M. Zi. Vol. 2. M.: Mir, 1986. 453 p.
4. Miurarka Sh.P. Silicides for VLSI. M.: Mir, 1986. 176 p.
5. Low-temperature formation method of contact layer of platinum silicide for high-power Schottky diodes / F.F. Komarov [et al.] // Reports of Belarus National Academy of Sciences. 2013. T. 53, No. 2. P. 38–42.
6. Two-step low temperature annealing for the Nickel-Platinum compound silicide formation for high-power Schottky diodes / V. Saladukha [et al.] // IX International Conference «Ion Implantation and Other Application of Ions and Electrons». Poland, Kazimierz Dolny, 25–28 June 2012. P. 99–100.
7. The formation of silicides by pulse heat treatment of film structures / V.A. Labunov [et al.] // Foreign electronic technique. 1985. No. 8. P. 27–53.
8. Pilipenko V.A., Ponomar V.N., Gorushko V.A. Properties controlling of thin-film systems using pulse photon treatment // Engineering-physical journal. 2003. Vol. 76, No. 4. P. 95–98.
9. Singh R., Nulman J. Development trends in the direction of rapid isothermal processing (RIP) dominated silicon integrated circuit fabrication // Material research society. 1991. P. 441–448.
10. Standart 11 050.003-83. Gases used in the manufacture of Electronics Articles. Technical requirements and control methods.

Сведения об авторах

Солодуха В.А., к.т.н., генеральный директор ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Пилипенко В.А., д.т.н., профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, заместитель директора по научному развитию ГЦ «Белмикрoанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Горushko В.А., ведущий инженер ГЦ «Белмикрoанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Филипеня В.А., ведущий инженер ГЦ «Белмикрoанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Information about the authors

Saladukha V.A., PhD, general manager of JSC «INTEGRAL» – holding managing company «INTEGRAL».

Pilipenko V.A., D.Sci, professor, corresponding member of the National academy of sciences of Belarus, deputy director of science development of state center «Belmicroanalysis» of JSC «INTEGRAL» – holding managing company «INTEGRAL».

Harushka V.A., leading engineer of state center «Belmicroanalysis» of JSC «INTEGRAL» – holding managing company «INTEGRAL».

Filipenya V.A., leading engineer of state center «Belmicroanalysis» of JSC «INTEGRAL» – holding managing company «INTEGRAL».

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Казинца, 121А,
ОАО «ИНТЕГРАЛ» –
управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
тел. +375-17-212-37-41;
e-mail: office@bms.by
Пилипенко Владимир Александрович.

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Kazintsa st., 121A,
JSC «INTEGRAL» –
holding managing company «INTEGRAL»
tel. +375-17-212-37-41;
e-mail: office@bms.by
Pilipenko Uladzimir Aleksandrovich