



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-5-10>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.002:533.9.004.14

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕАКТИВНОГО ИОННО-ЛУЧЕВОГО РАСПЫЛЕНИЯ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Е.В. ТЕЛЕШ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 18 октября 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Целью данной работы являлось исследование процесса реактивного ионно-лучевого распыления арсенида галлия с использованием оптического эмиссионного анализа плазмы в области мишени для определения оптимальных условий формирования собственных оксидов GaAs. Источником ионов являлся плазмотрон на базе ускорителя с анодным слоем, который генерировал поток ускоренных ионов аргона и кислорода с энергией 400–1200 эВ. Мишень была изготовлена из арсенида галлия, легированного теллуром. При распылении GaAs ионами Ar^+ в спектре обнаружены интенсивные линии GaI (2874,2 Å, 2943,6 Å, 4033,0 Å и 4172,1 Å), атомарного аргона ArI, ионов аргона, а также линии FeI. Появление линий железа может быть объяснено распылением полюсных наконечников магнитной системы ионного источника. Увеличение ускоряющего напряжения с 1 до 3 кВ приводит к росту интенсивности пиков атомарного галлия GaI (4172,1 Å) в 2,38 раза, линии GaI (4033,0 Å) – в 3,25 раза, линии GaI (2943,6 Å) – в 3,4 раза, линии GaI (2874,2 Å) – в 5 раз. Установлено, что увеличение парциального давления кислорода приводит к резкому уменьшению пиков GaI (4033,0 Å) и GaI (4172,1 Å) из-за химического взаимодействия галлия и кислорода. Распыление в чистом кислороде снижает интенсивность этих пиков в 8 и 5 раз соответственно. Интенсивность пиков атомарного галлия GaI (2874,2 Å) и GaI (2943,6 Å) снизилась в 2 и 1,78 раза соответственно. При наличии положительного потенциала на мишени интенсивность всех линий атомарного галлия монотонно снижается с увеличением потенциала. В эмиссионном спектре были обнаружены линии атомарного кислорода OI (7774,2 Å) и молекулярных положительных ионов O^+_2 (6418,7 Å, 6026,4 Å, 5631,9 Å и 5295,7 Å). При наличии положительного потенциала на мишени наблюдалось монотонное снижение интенсивности вышеуказанных линий кислорода. Это свидетельствует об интенсификации процессов химического взаимодействия кислорода с элементами мишени и, соответственно, о снижении свободных активных частиц кислорода.

Ключевые слова: собственные оксиды арсенида галлия, реактивное ионно-лучевое распыление, оптическая эмиссионная спектроскопия.

Для цитирования. Телеш Е.В. Исследование процесса реактивного ионно-лучевого распыления арсенида галлия с использованием оптической эмиссионной спектроскопии. Доклады БГУИР. 2021; 19(1): 5-10.

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF REACTIVE ION-BEAM SPUTTERING OF GALLIUM ARSENIDE USING OPTICAL EMISSION SPECTROSCOPY

EUGENE V. TELESH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 18 October 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The aim of this work was to study the process of reactive ion-beam sputtering of gallium arsenide using optical emission analysis of plasma in the target region to determine the optimal conditions for the formation of intrinsic GaAs oxides. The ion source was a plasmatron based on an anode layer accelerator (UAS), which generated a stream of accelerated argon and oxygen ions with an energy of 400–1200 eV. The target was made from tellurium doped gallium arsenide. Intense GaI lines (2874.2 Å, 2943.6 Å, 4033.0 Å and 4172.1 Å), atomic argon ArI, argon ions, and also FeI lines were detected in the spectrum upon sputtering of GaAs by Ar⁺ ions. The appearance of iron lines can be explained by the sputtering of the pole tips of the magnetic system of the ion source. An increase in the accelerating voltage from 1 to 3 kV leads to an increase in the intensity of the peaks of atomic gallium GaI (4172.1 Å) by 2.38 times, the GaI line (4033.0 Å) by 3.25 times, the GaI line (2943.6 Å) 3.4 times, GaI lines (2874.2 Å) 5 times. It was found that an increase in the partial pressure of oxygen leads to a sharp decrease in the peaks of GaI (4033.0 Å) and GaI (4172.1 Å) due to the chemical interaction of gallium and oxygen. Sputtering in pure oxygen reduces the intensity of these peaks by 8 and 5 times, respectively. The intensities of the peaks of atomic gallium GaI (2874.2 Å) and GaI (2943.6 Å) decreased in 2 and 1.78 times, respectively. In the presence of a positive potential on the target, the intensity of all lines of atomic gallium monotonically decreases with increasing potential. In the emission spectrum, lines of atomic oxygen OI (7774.2 Å) and molecular positive ions O⁺² (6418.7 Å, 6026.4 Å, 5631.9 Å and 5295.7 Å) were detected. In the presence of a positive potential on the target, a monotonic decrease in the intensity of the above oxygen lines was observed. This indicates an intensification of chemical interaction of oxygen with target elements and, accordingly, a decrease in the free active oxygen particles.

Keywords: intrinsic oxides of gallium arsenide, reactive ion beam sputtering, optical emission spectroscopy.

For citation: Telesh E.V. Investigation of the process of reactive ion-beam sputtering of gallium arsenide using optical emission spectroscopy. Doklady BGUIR. 2021; 19(1): 5-10.

Введение

Важной технологической задачей при изготовлении интегральных схем на арсениде галлия является формирование высококачественных диэлектрических слоев различного функционального назначения. В качестве материала пассивирующих слоев и подзатворного диэлектрика в МОП транзисторах применяются собственные оксиды GaAs [1]. Для формирования собственных оксидов используется термическое окисление в кислороде или озоне, анодирование в электролитах или в плазме кислорода и др. При термическом окислении арсенида галлия из-за высоких температур происходит испарение мышьяка, в состав пленок собственного оксида входит в основном Ga₂O₃ [2]. Такие пленки обладают низкой плотностью и, как правило, невысокими диэлектрическими параметрами.

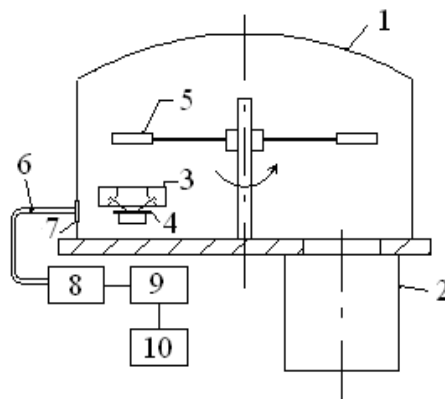
Низкотемпературный метод электрохимического анодирования позволяет достичь высокого качества границы раздела полупроводник – оксид [3]. Однако свежесаженные анодные оксиды обладают высокой пористостью и содержат много воды. При плазменном анодировании при температуре подложек ≤373 К образовывались стехиометрические оксиды и достигались высокие скорости роста [4]. Однако воздействие плазмы кислорода приводит к генерации положительного заряда в диэлектрике и к радиационным повреждениям поверхности полупроводника.

Ранее автором был разработан способ ионно-лучевого синтеза собственных оксидов GaAs, основанный на распылении мишени из GaAs ионами инертного газа и кислорода и

конденсации распыленных частиц на подложке [5]. Он позволяет наносить оксиды GaAs на любые подложки. Для стимуляции процесса химического взаимодействия кислорода с компонентами мишени на последней создается положительный потенциал. Характеристики оксидов зависят от состава рабочего газа, скорости нанесения, величины потенциала на мишени и т. п. Одним из методов диагностики распыленного материала является оптическая эмиссионная спектроскопия (ОЭС) и дальнейший анализ полученных данных по интенсивности спектральных линий при различных режимах ионно-лучевого распыления [6]. Этот метод бесконтактной диагностики неравновесной газоразрядной плазмы обладает высокими чувствительностью и информативностью. Задачей исследований являлось изучение процесса распыления GaAs с применением ОЭС для определения оптимальных условий формирования собственных оксидов GaAs.

Методика проведения эксперимента

Для экспериментальных исследований применялась вакуумная установка Z-400 фирмы LEYBOLD-HERAEUS. Источником ионов являлся плазмотрон на базе ускорителя с анодным слоем (УАС), который генерировал поток ускоренных ионов аргона и кислорода с энергией 400–1200 эВ. Распыляемая мишень была изготовлена из арсенида галлия, легированного теллуром. Поток ионов имел коническую форму, что позволило использовать мишень небольшого диаметра. Система ОЭС включала монохроматор ММ-101, фотоэлектронный умножитель ФЭУ-106, кварцевый световод. Спектр излучения плазмы записывался с помощью самописца КСП-4. Контроль вакуума осуществлялся вакуумметром ВИТ-2. Упрощенная схема подколпачного устройства установки Z-400 представлена на рис. 1.



1 – рабочая камера; 2 – высоковакуумный насос; 3 – источник ионов на основе УАС; 4 – мишень из арсенида галлия; 5 – подложкодержатель; 6 – кварцевый световод; 7 – окно из кварцевого стекла; 8 – монохроматор ММ-101; 9 – фотоэлектронный умножитель ФЭУ-106; 10 – самописец КСП-4

Рис. 1. Упрощенная схема подколпачного устройства установки вакуумного напыления Z-400
1 – working chamber; 2 – high-vacuum pump; 3 – an ion source based on the UAS; 4 – gallium arsenide target; 5 – substrate holder; 6 – quartz light guide; 7 – quartz glass window; 8 – monochromator MM-101; 9 – photomultiplier FEU-106; 10 – KSP-4 recorder

Fig. 1. Simplified diagram of the under-cap plant for vacuum deposition Z-400

Результаты и их обсуждение

Изучено реактивное ионно-лучевое распыление (РИЛР) мишени из GaAs ускоренными ионами аргона и кислорода. Исследовалось влияние энергии ионов, парциального давления кислорода и величины положительного потенциала на мишени на спектр излучения плазмы.

При распылении GaAs ионами Ar^+ в спектре обнаружены интенсивные линии GaI (2874,2 Å, 2943,6 Å, 4033,0 Å и 4172,1 Å), атомарного аргона ArI (4423,99 Å, 4198,32 Å, 4158,59 Å), ионов аргона Ar^+ (4348,06 Å, 4609,56 Å, 4879,87 Å), а также линии FeI (3485,34 Å, 3544,63 Å, 3558,51 Å) (рис. 2, а) [5]. Появление линий железа может быть объяснено

распылением полюсных наконечников магнитной системы ионного источника. Увеличение энергии ионов с 400 до 1200 эВ (соответствует изменению ускоряющего напряжения на аноде ионного источника с 1 до 3 кВ) приводит к росту интенсивности пиков атомарного галлия GaI (4172,1 Å) в 2,38 раза, линии GaI (4033,0 Å) – в 3,25 раза, линии GaI (2943,6 Å) – в 3,4 раза, линии GaI (2874,2 Å) – в 5 раз (рис. 2, b).

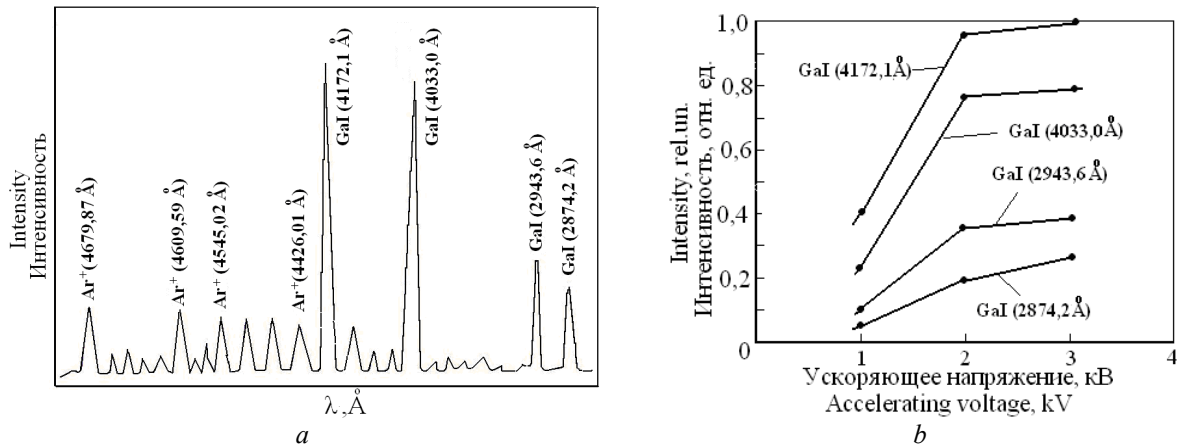


Рис. 2. Спектр излучения плазмы при распылении GaAs ионами аргона (a) и влияние ускоряющего анодного напряжения на на интенсивность пиков атомарного галлия (b)

Fig. 2. Spectrum of plasma radiation during GaAs sputtering by argon ions (a) and the effect of the accelerating anode voltage on the intensity of atomic gallium peaks (b)

Результаты ЭОС при РИЛР арсенида галлия ионами аргона и кислорода приведены на рис. 3, a. Общее рабочее давление составляло $7,98 \cdot 10^{-2}$ Па, ускоряющее напряжение – 2 кВ. Установлено, что увеличение парциального давления кислорода приводит к резкому уменьшению пиков GaI (4033,0 Å) и GaI (4172,1 Å) из-за химического взаимодействия галлия и кислорода. Распыление в чистом кислороде снижает интенсивность этих пиков в 8 и 5 раз соответственно. Интенсивность пиков атомарного галлия GaI (2874,2 Å) и GaI (2943,6 Å) снизилась в 2 и 1,78 раза соответственно [5].

Исследование влияния положительного потенциала на мишени U_M на спектры излучения проводилось при ускоряющем напряжении на аноде 2 кВ и парциальном давлении кислорода $5,32 \cdot 10^{-2}$ Па. Установлено, что интенсивность всех линий атомарного галлия монотонно снижается с увеличением потенциала (рис. 3, b). Следует отметить, что, в отличие от зависимости, приведенной на рис.3, a, сигнал от GaI (2874,2 Å) и GaI (2943,6 Å) уменьшался в большей степени, чем сигналы от GaI (4033,0 Å) и GaI (4172,1 Å).

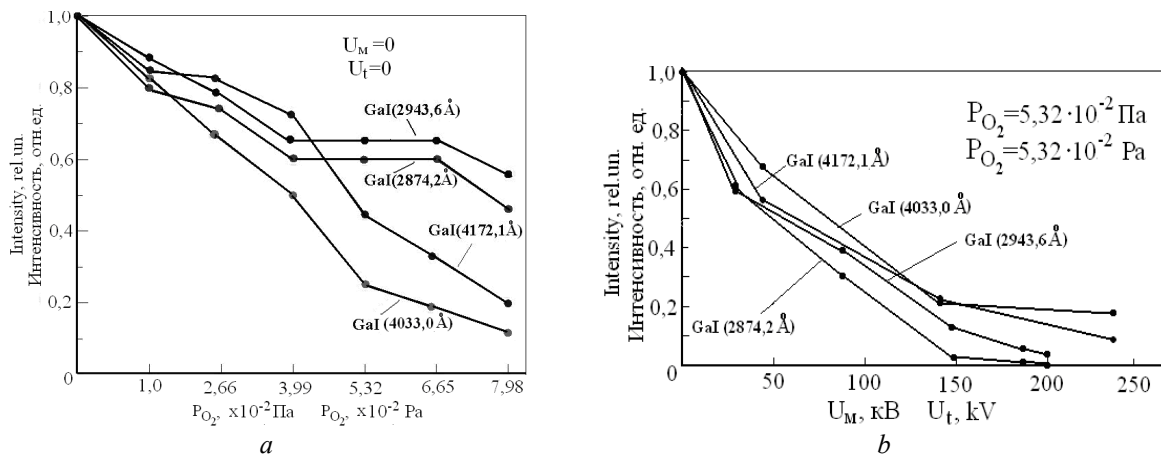


Рис. 3. Влияние парциального давления кислорода в рабочем газе (a) и напряжения на мишени (b) на интенсивности линий атомарного галлия

Fig. 3. The influence of the partial pressure of oxygen in the working gas (a) and the voltage on the target (b) on the intensity of the lines of atomic gallium

Известно, что активными частицами кислородной плазмы могут быть положительные атомарные и молекулярные ионы, озон, возбужденные молекулы и атомы кислорода [6]. Положительные ионы кислорода (молекулярные и атомные) образуются вследствие электронной бомбардировки и процессов перезарядки. Повышенной химической активностью обладают возбужденные молекулы и атомы кислорода, которые возникают при наличии положительного потенциала на распыляемой мишени [7]. Кроме того, имеет место ионизация и возбуждение распыленных атомов мишени в плазме вторичного плазменного разряда, что также будет способствовать более эффективному взаимодействию галлия и мышьяка с кислородом.

При распылении арсенида галлия в атмосфере аргона и кислорода в эмиссионном спектре были обнаружены линии атомарного кислорода OI (7774,2 Å) и молекулярных положительных ионов O₂⁺ (6418,7 Å, 6026,4 Å, 5631,9 Å и 5295,7 Å). При наличии положительного потенциала на мишени наблюдалось монотонное снижение интенсивности вышеуказанных линий кислорода (рис. 4). Это свидетельствует об интенсификации процессов химического взаимодействия кислорода с элементами мишени и, соответственно, о снижении свободных активных частиц кислорода.

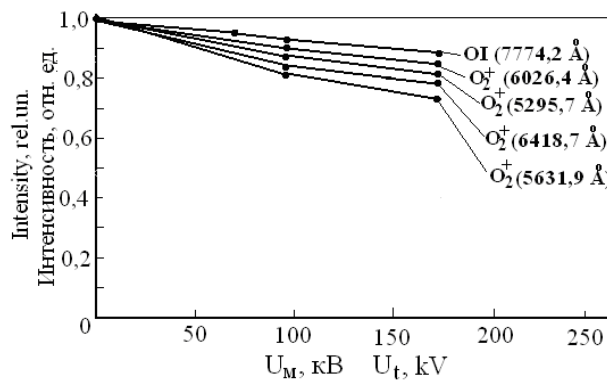


Рис. 4. Влияние напряжения на мишени на интенсивности линий кислорода
Fig. 4. The effect of voltage on targets on the intensity of oxygen lines

Таким образом, наличие положительного потенциала на мишени позволяет значительно уменьшить интенсивность пиков галлия, что способствует получению качественных оксидов арсенида галлия при пониженном парциальном давлении кислорода [5].

Заключение

При РИЛР мишени из GaAs ионами аргона в эмиссионном спектре наблюдались интенсивные пики атомарных галлия и аргона, ионов аргона, а также линии атомарного железа. Повышение ускоряющего напряжения на аноде с 1 до 3 кВ привело к увеличению интенсивности пиков атомарного галлия в 2,4–5 раз. При распылении мишени в смеси аргона и кислорода в эмиссионном спектре были обнаружены линии атомарного кислорода и его молекулярных положительных ионов. Установлено, что увеличение парциального давления кислорода приводило к резкому уменьшению пиков атомарного галлия из-за химического взаимодействия галлия и кислорода. При наличии положительного потенциала на мишени интенсивность всех линий атомарного галлия резко уменьшалась, что свидетельствует об интенсификации процессов химического взаимодействия кислорода с элементами мишени. Это способствует получению качественных оксидов арсенида галлия при пониженном парциальном давлении кислорода в рабочем газе. Так как ион кислорода имеет меньшую массу, чем ион аргона, то коэффициент распыления атомов мишени ионами аргона будет выше. Поэтому снижение доли кислорода в рабочем газе ведет к повышению скорости нанесения покрытий.

Список литературы

1. Passlack M., Hong M., Mannaerts J.P. C-V and G-V characterization of in-situ fabricated Ga[2]O[3]-GaAs interfaces for inversion/accumulation device and surface passivation applications. *Solid-State Electronics*. 1996; 39:8:1133-1136.
2. Томина Е.В., Миттова И.Я., Сухочев А.С. Термическое окисление арсенида галлия с поверхностью, модифицированной оксидами переходных металлов. *Физика и химия стекла*. 2010;36:2:297-306.
3. Агеев О.А., Солодовник М.С., Смирнов В.А. Исследование режимов локального анодного окисления эпитаксиальных структур арсенида галлия. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2011;4(117):8-13.
4. Лежава Н.Г., Бибилашвили А.П., Герасимов А.Б. Применение собственного оксида арсенида галлия для создания изоляции активных элементов интегральных схем на GaAs. *Письма в ЖТФ*. 2005;31:2:63-66.
5. Достанко А.П., Бордусов С.В., Залесский В.Г.; под ред. Достанко А.П. *Технологические процессы и системы в микроэлектронике: плазменные, электронные, электронно-ионно-лучевые, ультразвуковые*. Минск: Бестпринт; 2009.
6. Достанко А.П., Кундас С.П., Босяков М.Н.; под ред. Достанко А.П. *Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники*. В 3-х т. Т. 1. Минск: ФУАинформ; 2000.
7. Достанко А.П., Русецкий А.М., Ануфриев Л.П., Бордусов С.В., Голосов Д.А., Завадский С.М., Ковальчук Н.С., Коробко А.О., Ланин В.Л., Мадвейко С.И., Телеш Е.В.; под ред. Достанко А.П., Ланина В.Л. *Интегрированные технологии микро- и наноструктурированных слоев: монография*. Минск: Бестпринт; 2013.

References

1. Passlack M., Hong M., Mannaerts J.P. C-V and G-V characterization of in-situ fabricated Ga[2]O[3]-GaAs interfaces for inversion/accumulation device and surface passivation applications. *Solid-State Electronics*. 1996;39:8:1133-1136.
2. Tomina Y.V., Mittova I.Y., Sukhochev A.S. [Thermal oxidation of gallium arsenide with a surface modified by transition metal oxides]. *Fizika i khimiya stekla = Physics and chemistry of glass*. 2010;36:2:297-306. (In Russ.)
3. Ageyev O.A., Solodovnik M.S., Smirnov V.A. [Investigation of the modes of local anodic oxidation of epitaxial structures of gallium arsenide]. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskkiye nauki = News SFU. Technical science*. 2011;4(117):8-13. (In Russ.)
4. Lezhava N.G., Bibilashvili A.P., Gerasimov A.B. [The use of intrinsic gallium arsenide oxide to create insulation of active elements of integrated circuits on GaAs]. *Pis'ma v ZHTF = Letters to the JTP*. 2005;31:2:63-66. (In Russ.)
5. Dostanko A.P., Bordusov S.V., Zalesskiy V.G.; pod red. Dostanko A.P. [*Technological processes and systems in microelectronics: plasma, electronic, electron-ion beam, ultrasonic*]. Minsk: Bestprint; 2009. (In Russ.)
6. Dostanko A.P., Kundas C.P., Bosyakov M.N.; pod red. Dostanko A.P. [*Plasma processes in the manufacture of electronic products*]. V 3-h t. T. 1. Minsk: FUAinform; 2000. (In Russ.)
7. Dostanko A.P., Rusetskij A.M., Anufriev L.P., Bordusov S.V., Golosov D.A., Zavadskij S.M., Kovalchuk N.S., Korobko A.O., Lanin V.L., Madvejko S.I., Telesh E.V.; pod red. Dostanko A.P., Lanina V.L. [*Integrated technology of micro- and nanostructured layers: monograph*]. Minsk: Bestprint; 2013. (In Russ.)

Сведения об авторах

Телеш Е.В., старший преподаватель кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Telesh E.V., Senior Lecturer of the Electronic Technique and Technology Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-85-81;
e-mail: etelesh@mail.ru
Телеш Евгений Владимирович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-85-81;
e-mail: etelesh@mail.ru
Telesh Evgeniy Vladimirovich