

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА СОЗДАНИЯ КОНТАКТОВ С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ К ПОРИСТЫМ ПОЛУПРОВОДНИКАМ

ОКСАНИЧ А.П., ПРИТЧИН С.Э.,  
КОГДАСЬ М.Г., ХОЛОД А.Г., МАЩЕНКО М.А.

Устанавливается, что качество контактов определяется, главным образом, характером распределения химических элементов в приконтактной области, а также временем и температурой отжига контактной структуры. Данный метод позволяет получить контакты с удельным сопротивлением  $\rho_k \approx 1,1 \cdot 10^{-4}$  Ом·см<sup>2</sup> при температуре отжига 350 °С и времени отжига 30 мин. Предложенный метод позволяет уменьшить коэффициент неидеальности контакта с барьером Шоттки с 1,7 до 1,2.

**Ключевые слова:** полупроводник, пористость, GaAs, диод Шоттки.

**Key words:** semiconductor, porous, GaAs, diode Schottky.

### 1. Введение

Диод Шоттки (ДШ) является одним из базовых элементов современной микроэлектроники [1].

В основу технологии диода Шоттки положен контакт металла и полупроводника, приводящий к образованию потенциального барьера [1, 2]. С точки зрения физики идеальный контакт металл/полупроводник является простейшей модельной структурой. Механизмы протекания тока в диодах Шоттки подробно описаны в литературе, например, в [3, 4].

Формирование контакта металл/полупроводник может считаться одной из самых простых операций полупроводниковой технологии. Известно большое количество способов осаждения металлических слоёв на поверхности полупроводника [5-7]. В то же время свойства контакта металл/полупроводник существенно зависят от условий и применяемого метода напыления [8, 9]. При этом сложность формирования идеальной границы раздела между металлом и полупроводником остается основной проблемой технологии диодов Шоттки.

Однако для разработки устройств на базе *poro-GaAs* наиболее важным требованием является наличие низкого сопротивления и стабильных электрических контактов. Как известно, одной из основных нерешенных проблем *poro-GaAs* является неустойчивость его поверхности, которая вызывает спонтанное окисление в окружающей атмосфере и приводит к деградации поверхностных структур. В результате становится затруднительным образование стабильного омического контакта, что делает коммерческое применение проблематичным. Таким образом, стабилизация поверхностей *poro-GaAs* и изготовления надежных электрических контактов к *poro-GaAs* явля-

ются главной проблемой устройств на основе *poro-GaAs*.

### 2. Постановка задачи

В работах [10, 11] рассмотрено использование таких металлов как Ag, Au, Pd и их сплавов в качестве выпрямляющих контактов к *porousGaAs*.

В отличие от контактов к GaAs особенностью создания контактов к *porousGaAs* является то, что пористый слой не подлежит полированию и травлению, а также процедура отжига контактов может разрушить структуру пористого слоя. Это говорит о проблемах, с которыми сталкиваются специалисты при создании данных контактов.

Известно [1, 2], что для реализации высококачественного выпрямляющего контакта необходимо обеспечить максимально возможное равномерное смачивание поверхности полупроводника металлом, например, Pd. Проплавление полупроводника должно быть неглубоким и равномерным, а рекристаллизация из расплава – быстрой. Все вместе это гарантирует образование на границе "металл – полупроводник" тонкого высоколегированного слоя GaAs и исключение микрокоалесценции тонких пленок при формировании контакта [5]. В связи с этим возникает необходимость исследования влияния на качество выпрямляющего контакта целого ряда технологических факторов, в той или иной мере связанных с процессом термообработки.

### 3. Создание контактов с барьером Шоттки к пористым полупроводникам

В работе использовались эпитаксиальные структуры GaAs:Sn – GaAs:Si. В качестве подложки применялась сторона *n+-GaAs:Sn* толщиной 400 мкм с концентрацией носителей заряда  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>, на слое *n-GaAs:Si* – толщиной 20 мкм с концентрацией носителей заряда  $10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Электрохимическим методом формировался пористый слой при вариации режимов травления. Всего было изготовлено 4 образца.

Перед формированием контактов пластины очищали и обезжиривали путем последовательных погружений в органические растворители трихлорэтилена, ацетона, метанола, затем промывали дионизированной водой и сушили сухим азотом.

Первоначально на всех образцах к слою *n+-GaAs:Sn* методом электронно-лучевого напыления создавался омический контакт диаметром 1 мм AgGePd-GaAs с толщинами слоев 100/50/10 нм соответственно, с последующим отжигом в течение 20 мин. при температуре 350 °С в среде аргона (рис. 1,а).

Пористый слой формировался при токе травления 30 мА в течение 3 мин. в растворе травителя HF:C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH=1:1. Область травления освещалась

источником света мощностью 100 Вт, в качестве которого использовалась галогенная лампа. Контакт Шоттки на слое n-porousGaAs:Si создавался методом химического осаждения с помощью раствора: 0,3 г PdCl<sub>2</sub>, смешанного с 9 мл HCl (32%) и разбавленного 9 мл H<sub>2</sub>O. Далее этот раствор смешивали с 864 мл ледяной уксусной кислоты и затем добавляли 18 мл HF (40%) с последующим перемешиванием. Толщина полученного контакта Pd/n-GaAs и Pd/porousGaAs составляла около 0,3 мкм, далее проводился отжиг образцов при различных температурных режимах (рис. 1,б).

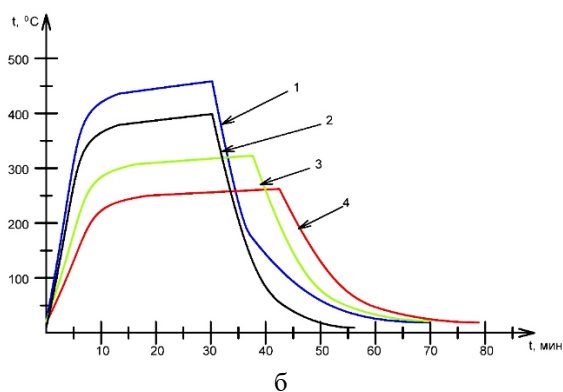
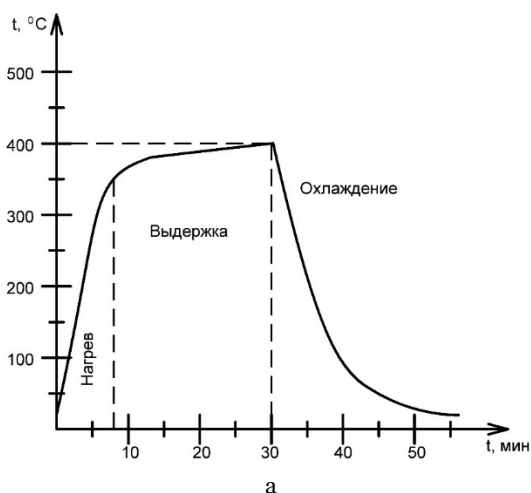


Рис. 1. Температурный режим впаивания контактов к пластине в среде аргона: а – омических контактов; б – контактов с барьером Шоттки (1– $t=450$  °C; 2– $t=350$  °C; 3– $t=300$  °C; 4– $t=250$  °C)

Помимо точности поддержания заданных режимов в процессе термообработки (температуры, времени, состава газовой среды), важными параметрами, влияющими на процессы формирования границы раздела "металл-полупроводник", являются скорости нагрева и охлаждения образца. Для наилучшего удовлетворения всех требований к условиям формирования применялось устройство, которое обеспечивало подъем температуры образцов со скоростью 50 – 60 °C/с, почти с такой же скоростью образцы охлаждались. Отбор тепла от расплавленной области на границе раздела "металл-полупроводник" осу-

ществлялся, в основном, через подложку. Это создавало условия для равномерной кристаллизации и улучшения морфологии контакта. Схема структуры AgGePd/porousGaAs/AgPd приведена на рис. 2.

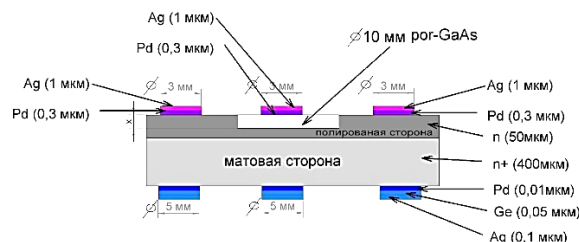


Рис. 2. Схематическое изображение структур AgGePd/porousGaAs/AgPd

Для понимания природы наблюдаемых эффектов в контактах металл porousGaAs (M-porousGaAs), рассмотрим их ВАХ. Как правило, выражение для ВАХ контактов металл-полупроводник (барьеры Шоттки) описывается моделью термоэлектронной эмиссии [12]

$$I = I_S \exp\left[\frac{(qV - IR_S)}{kT} - 1\right], \quad (1)$$

где  $R_S$  – является последовательным сопротивлением, а  $I_S$  – ток насыщения, который может быть выражен как

$$I_S = A^* \times T^2 \exp\left[\frac{-\phi_b}{kT}\right]. \quad (2)$$

В этом уравнении  $A^*$  – постоянная Ричардсона;  $\phi_b$  – высота барьера Шоттки. Согласно правилу Шоттки-Мотта, барьер между металлом и полупроводником должен быть пропорционален разности функции металл-вакуум и электронному средству полупроводник-вакуум:

$$\phi_b = \phi_M - \chi_S, \quad (3)$$

где  $\phi_M$  – функция металла, а  $\chi_S$  – электронное средство полупроводника.

Уравнение (1) для прямой ветви вольтамперной характеристики реального контакта МП (контакта с барьером Шоттки) при напряжениях, больших, чем  $3kT/q$ , может быть записано в следующем виде:

$$I = S j_s \exp\left\{-\frac{qU}{nkT}\right\}, \quad (4)$$

где  $S$  – площадь металлического барьерного электрода;  $U$  – напряжение от внешнего источника, приложенное к контакту в прямом направлении;  $n$  – коэффициент идеальности контакта. В свою очередь, коэффициент идеальности контакта  $n$  можно определить из выражения (4):

$$n = \frac{e}{kT} \left[ \frac{d(\ln I)}{dU} \right]^{-1} = \frac{1}{\ln(10)} \frac{e}{kT} \left[ \frac{d(\lg I)}{dU} \right]^{-1}, \quad (5)$$

$$n = \frac{1}{\ln(10)} \frac{e}{kT} \left[ \frac{dI}{dU} \right]^{-1}. \quad (6)$$

Тогда высота барьера Шоттки может быть вычислена из (2) и (4):

$$\phi_{\delta} = \ln \left( \frac{A^* T^2}{I_s} \right) \frac{nkT}{|e|}. \quad (7)$$

Отметим, что описанный способ справедлив для случая  $1 \leq n \leq 2$ .

На рис. 3 приведены ВАХ контактов Шоттки Pd/porousGaAs, полученные для исследуемых образцов. Как видно, характеристики I(V) всех структур заметно различаются. Также из ВАХ можно видеть, что контакт Pd/porousGaAs, отжиг которого проводился при температуре 350 °С, наиболее близок к контакту Шоттки.

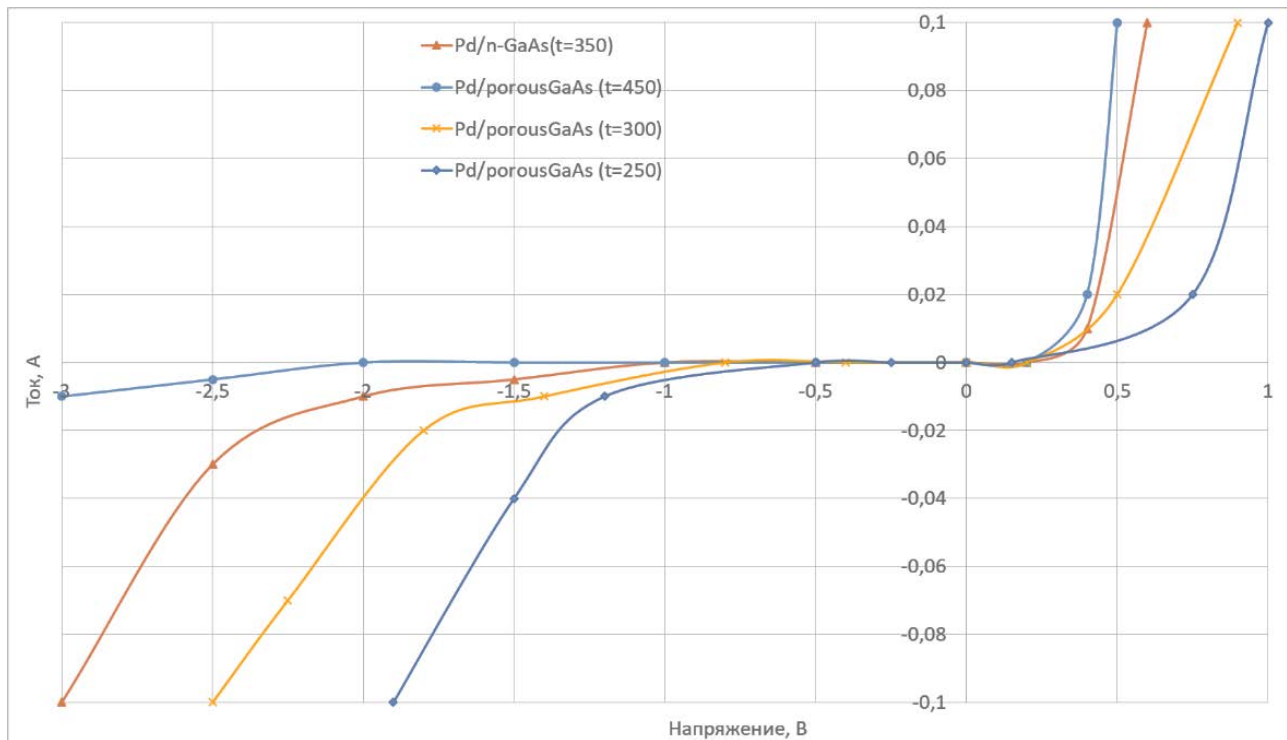


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики контактов Шоттки для исследуемых образцов Pd/porousGaAs (линейный масштаб)

На основе полученных в работе ВАХ были определены в соответствии с выражениями (6) значения коэффициента идеальности и последовательного сопротивления для структур всех образцов. Результаты сведены в таблицу.

Низкоуровневые переходные сопротивления контактов Pd/porousGaAs обусловлены малой толщиной пористого слоя GaAs и низким сопротивлением начального сильно легированного n-типа GaAs.

Полученные значения потенциала высоты барьера в значительной степени выше, чем результаты измерений I (V). Такие различия обусловлены наличием межфазного слоя и интерфейсных состояний на границе Pd/porousGaAs. Образование тонкого межфазного слоя неизбежно при изготовлении устройства обычными методами. Такой межфазный слой индуцирует уровни ловушек на границе раздела металл/полупроводник, вызывая отклонение от идеального поведения и, следова-

тельно, значительно увеличивая потенциал высоты барьера.

Значения коэффициента идеальности (n), последовательного сопротивления ( $R_s$ ) и высоты барьера Шоттки ( $\phi_{\delta}$ ) контактов Pd/GaAs и Pd/porGaAs для исследуемых образцов

Образец	Коэффициент идеальности (n)	Последовательное сопротивление ( $R_s$ ), Ом	Высота барьера Шоттки ( $\phi_{\delta}$ ), эВ
Pd/porousGaAs (1)	1,35	1,78	0,69
Pd/porousGaAs (2)	1,2	1,76	0,68
Pd/porousGaAs (3)	1,5	1,8	0,7
Pd/porousGaAs (4)	1,7	1,87	0,72

Исходя из результатов исследования (см. таблицу), лучшая адгезия контактного материала к porousGaAs получена при температуре отжига 350 °С,  $R_s = 1,76 \text{ Ом}$ .

Проведено также исследование зависимости удельного сопротивления контактов  $\rho_k$  от температуры и времени отжига в диапазоне температур 250–450 °С и времени отжига 20–40 мин. (рис. 4).

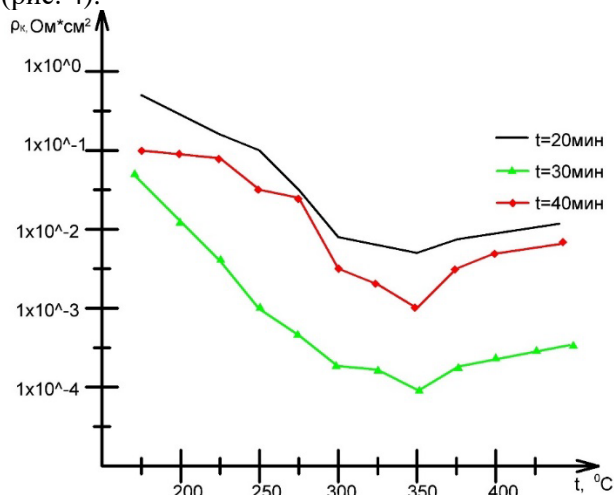


Рис. 4. Влияние температуры и времени отжига на удельное переходное сопротивление  $\rho_k$  контактов Pd/porous-GaAs

Установлено, что время и температура отжига контактной структуры существенно влияют на качество контакта. Лучшие результаты  $\rho_k \approx 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$  получены при температуре отжига 350 °С и времени отжига 30 мин.

Кроме того, полученные значения коэффициента идеальности остаются больше единицы для контактов Pd/porousGaAs. Очевидно, что это связано с дефектами, вызванными наличием тонкого изолирующего слоя, произвольного образования оксидного слоя в процессе изготовления контактов между палладием и porousGaAs.

#### 4. Выводы

Установлено, что качество контактов определяется, главным образом, характером распределения химических элементов в приконтактной области, а также временем и температурой отжига контактной структуры. Данный метод позволил получить контакты с удельным сопротивлением  $\rho_k \approx 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$  при температуре отжига 350 °С и времени отжига 30 мин.

Усовершенствован метод создания контактов с барьером Шоттки в пористых полупроводниках, который отличается применением химического метода нанесения Pd на пористый GaAs с последующим напылением слоев Ge и Ag и отжигом. Определены температура отжига, которая составила 350 °С, и время отжига, который составил 20 мин. Усовершенствованный метод позволил уменьшить коэффициент неидеальности контакта с барьером Шоттки с 1,7 до 1,2.

#### Литература:

1. Newman N., M. van Schilfgaarde, Kendelewicz T., Williams M.D., W.E. Spicer Electrical study of Schottky barriers on atomically clean GaAs (100) surfaces // Phys. Rev. B. 1986. V.33, n.2. P.1146-1159.
2. Heng-Yong Nie and Yasuo Nannichi. Pd-on-GaAs Schottky Contact: Its Barrier Height and Response to Hydrogen // Jpn. J. Appl. Phys. 30. 1991. P. 906-913.
3. Nguyen D., Jaffrezic-Renault N., Martin J.R., Clechet P. and Stremdoeder G. Contact Reactions in Pd/n-GaAs Junctions Formed by Palladium Electroless Deposition // J. Electrochem. Soc., Vol. 140, No. 2, February 1993. P. 519-525.
4. Çankaya G., Abay B. Semicond Current- and capacitance-voltage characteristics of Cd/p-GaTe Schottky barrier diodes under hydrostatic pressure // Sci. Technol. 21(2006)124.
5. Gaponenko Sergey V. Introduction to Nanophotonics Cambridge University Press. 2010. 485p.
6. Giovanni Flamand\* and JefPoortmans Porous GaAs as a possible antireflective coating and optical diffusor for III-V solar cells // Phys. stat. sol. (a) 202, No. 8, 2005. P. 1611–1615.
7. Alireza Salehi, Alireza Nikfarjam, and Dara Jamshidi Kalantari Highly Sensitive Humidity Sensor Using Pd/Porous GaAs Schottky Contact // IEEE SENSORS JOURNAL. Vol. 6, NO. 6, DECEMBER. 2006. P. 1415-1421.
8. Newman N., M. van Schilfgaarde, Kendelewicz T., Williams M.D., Spicer W.E. Electrical study of Schottky barriers on atomically clean GaAs (100) surfaces // Phys. Rev. B. 1986. Vol. 33, n.2. P.1146-1159.
9. Heng-Yong Nie and Yasuo Nannichi. Pd-on-GaAs Schottky Contact: Its Barrier Height and Response to Hydrogen // 1991 Jpn. J. Appl. Phys. 30. P. 906-913.
10. Salehi A., Jamshidi Kalantari D., Goshtasbi A. Rapid Response of Au/Porous-GaAs Humidity Sensor at Room Temperature // Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices, 2006. 6-8 Dec. 2006. P. 125 – 128.
11. Salehi A., Nikfarjam A., and Kalantari D.-J. Pd/porous-GaAs Schottky contact for hydrogen sensing applications // Sens. Actuators B, Chem., Jan. 2006. Vol. 113, no. 1. P. 419–427.
12. Çankaya G., Abay B., Current- and capacitance-voltage characteristics of Cd/p-GaTe Schottky barrier diodes under hydrostatic pressure Semicond. Sci. Technol. 21(2006)124.

Поступила в редколлегию 11.06.2018

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. Слипченко Н.И.  
**Оксанич Анатолий Петрович**, д-р техн. наук, профессор, директор НИИ технологии полупроводников и информационно-управляющих систем КрНУ им. М. Остроградского, заведующий кафедрой информационно-управляющих систем. Научные интересы: методы и аппаратура контроля структурно-совершенных полупроводниковых монокристаллов, пористые полупроводники. Адрес: Украина, 39600, Кременчуг, ул. Первомайская, 20, тел.: (05366) 30157. E-mail: oksanich@kdu.edu.ua

**Пritchyn Сергей Эмильевич**, д-р техн. наук, доцент, проф. кафедры информационно-управляющих систем КрНУ им. М. Остроградского. Научные интересы: автоматизация процессов управления производством полупроводниковых материалов. Адрес: Украина, 39600, Кременчуг, ул. Первомайская, 20, тел.: (05366) 30157. E-mail: pritchinse@ukr.net

**Когдась Максим Григорьевич**, канд. техн. наук, ст. преп. кафедры информационно-управляющих систем КрНУ им. М. Остроградского. Научные интересы: автоматизация процессов управления производством полупроводниковых материалов. Адрес: Украина, 39600, Кременчуг, ул. Первомайская, 20, тел.: (05366) 30157. E-mail: kogdasMax@yahoo.com

**Холод Алексей Григорьевич**, ст. преп. кафедры информационно-управляющих систем КрНУ им. М. Остроградского. Научные интересы: автоматизация процессов управления производством полупроводниковых материалов. Адрес: Украина, 39600, Кременчуг, ул. Первомайская, 20, тел.: (05366) 30157.

**Машченко Михаил Анатольевич**, аспирант кафедры информационно-управляющих систем КрНУ им. М. Остроградского. Научные интересы: автоматизация процессов управления производством полупроводниковых материалов. Адрес: Украина, 39600, Кременчуг, ул. Первомайская, 20, тел.: (05366) 30157.

**Oksanich Anatoly Petrovich**, Dr. Tech. Sciences, Professor, Director of the Institute of Semiconductor Technology and Information Management Systems, KrNU named after M. Ostrogradsky, Head of the Department on Information Management Systems. Research interests: methods and equipment for the control of structurally perfect semiconductor single crystals, porous semiconductors. Address: Ukraine, 39600, Kremenchug, Pervomaiskaya Str, 20, tel. (05366) 30157. E-mail: [oksanich@kdu.edu.ua](mailto:oksanich@kdu.edu.ua)

**Pritchyn Sergey Emilevich**, Dr. Tech. Sciences, associate professor, Department on Information Management Systems, KrNU named after M. Ostrogradsky. Research interests: automation of semiconductor materials production management processes. Address: Ukraine, 39600, Kremenchug, Pervomayskaya Str, 20, tel. (05366) 30157. E-mail: pritchinse@ukr.net

**Kogdas' Maxim Grigorievich**, PhD, Senior Teacher, Department of Information Management Systems, KrNU named after M. Ostrogradsky. Research interests: automation of semiconductor materials production management processes. Address: Ukraine, 39600, Kremenchug, Pervomayskaya Str, 20, tel. (05366) 30157. E-mail: kogdasMax@yahoo.com

**Holod Alexey G.**, Senior Teacher, Department of Information Management Systems, KrNU named after M. Ostrogradsky. Research interests: automation of production control processes for semiconductor materials. Address: Ukraine, 39600, Kremenchug, Pervomayskaya Str, 20, tel. (05366) 30157.

**Mashchenko Mikhail Anatolyevich**, PhD student, Department Of Information Management Systems, KrNU named after M. Ostrogradsky. Research interests: automation of production control processes for semiconductor materials. Address: Ukraine, 39600, Kremenchug, Pervomaiskaya Str, 20, tel. (05366) 30157