

10-10-2019

## NONIDEALITY COEFFICIENT OF CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC OF P-N-JUNCTIONS IN STRONG MICROWAVE FIELD AND WHEN ILLUMINATED BY LIGHT

Gafur Gulyamov

*Namangan engineering-construction institute Doctor of science (DSc) in physical and mathematical sciences, associate professor*

Muxammadjon Gulomkodirovich Dadamirzayev

*Namangan engineering-construction institute Doctor of science (DSc) in physical and mathematical sciences, associate professor*

Mamura Odiljonovna Kosimova

*Namangan engineering-construction institute senior teacher*

Follow this and additional works at: <https://uzjournals.edu.uz/namdu>



Part of the [Physical Sciences and Mathematics Commons](#)

---

### Recommended Citation

Gulyamov, Gafur; Dadamirzayev, Muxammadjon Gulomkodirovich; and Kosimova, Mamura Odiljonovna (2019) "NONIDEALITY COEFFICIENT OF CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC OF P-N-JUNCTIONS IN STRONG MICROWAVE FIELD AND WHEN ILLUMINATED BY LIGHT," *Scientific Bulletin of Namangan State University*. Vol. 1 : Iss. 10 , Article 7.

Available at: <https://uzjournals.edu.uz/namdu/vol1/iss10/7>

This Article is brought to you for free and open access by 2030 Uzbekistan Research Online. It has been accepted for inclusion in Scientific Bulletin of Namangan State University by an authorized editor of 2030 Uzbekistan Research Online. For more information, please contact [brownman91@mail.ru](mailto:brownman91@mail.ru).

---

**NONIDEALITY COEFFICIENT OF CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC OF P-N-  
JUNCTIONS IN STRONG MICROWAVE FIELD AND WHEN ILLUMINATED BY  
LIGHT**

**Cover Page Footnote**

???????

**Erratum**

???????

## **ЎЮЧ МАЙДОНДА ЁРУГЛИК ТАЪСИРИДАГИ p-n-ЎТИШ ВАХ НОИДЕАЛЛИК КОЭФФИЦИЕНТИ**

Гафур Гулямов

Наманган муҳандислик - қурилиш институти  
Физика – математика фанлари доктори, профессор  
Мухаммаджон Дадамирзаев Гуломкодирович  
Наманган муҳандислик - қурилиш институти  
Физика – математика фанлари доктори, профессор  
Мамура Косимова Одилжоновна  
Наманган муҳандислик - қурилиш институти  
Катта ўқитувчи

***Аннотация:** Бир вақтда ёруғлик ва кучли ЎЮЧ (ўта юқори частотали) майдон таъсир қилганда p-n-ўтиш ВАХ (волт-ампер характеристика) ноидеаллик коэффицентини ўзгаришининг янада сезгир бўлиши кўрсатилган. ЎЮЧ ва ёруғлик таъсирида p-n-ўтишда рекомбинацион ва генерацион жараёнлар пайдо бўлиши ва уларнинг ноидеаллик коэффицентига кучли таъсир қилиши аниқланди.*

***Калит сўзлар:** қизиган электрон ва коваклар, ЎЮЧ майдон, салт юриш кучланиши, қисқа туташув токи, p-n-ўтиш ВАХ, ноидеаллик коэффицентини.*

## **КОЭФФИЦИЕНТ НЕИДЕАЛЬНОСТИ ВАХ p-n-ПЕРЕХОДА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СВЕТА В СВЧ ПОЛЕ**

Гафур Гулямов

Наманганский инженерно-строительный институт  
Профессор, доктор физика – математических наук  
Мухаммаджон Дадамирзаев Гуломкодирович  
Наманганский инженерно-строительный институт  
Профессор, доктор физика – математических наук  
Мамура Косимова Одилжоновна  
Наманганский инженерно-строительный институт  
Старший преподаватель

***Аннотация:** Показано, что изменение коэффициента неидеальности вольтамперной характеристики p-n перехода является более чувствительным, когда одновременно действует свет и мощное СВЧ поле. Установлено, что под действием СВЧ поля и света возникают на p-n-переходе рекомбинационные и генерационные процессы, которые сильно влияют на коэффициент неидеальности.*

***Ключевые слова:** горячие электроны и дырки, СВЧ поля, напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, ВАХ p-n-перехода, коэффициент неидеальности.*

## **NONIDEALITY COEFFICIENT OF CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC OF P-N-JUNCTIONS IN STRONG MICROWAVE FIELD AND WHEN ILLUMINATED BY LIGHT**

GafurGulyamov

Namangan engineering-construction institute

Doctor of science (DSc) in physical and mathematical sciences, associate professor,

Muxammadjon Dadamirzayev Gulomkodirovich

Namangan engineering-construction institute

Doctor of science (DSc) in physical and mathematical sciences, associate professor,

Mamura Kosimova Odiljonovna

Namangan engineering-construction institute

senior teacher

**Abstract:** *It is shown that the change in the non-ideality coefficient of the voltage-current characteristic of the  $p-n$  junction is more sensitive when light and a powerful microwave field act simultaneously. It has been established that, under the action of the microwave field and light, recombination and lasing processes arise on the  $p-n$  junction, which strongly influence on the nonideality coefficient.*

**Keywords:** *hot electrons and holes, microwave fields, nonideality coefficient,  $p-n$  junction current-voltage characteristic.*

В развитие микроэлектроники важное место занимает полупроводниковые приборы, основаниям их являются  $p-n$ -переходы. Поэтому требуются глубокие исследования физических основ полупроводниковых  $p-n$ -переходов и принципы действия им внутренних внешних факторов. Традиционным методом является изучение вольт-амперной характеристики  $p-n$ -перехода. Основные теории ВАХ  $p-n$ -перехода в начале исследованы Шокли [1]. Под влиянием разных внешних воздействий были наблюдаены отклонение от идеальности ВАХ  $p-n$ -перехода. Впервые со стороны Шокли введен коэффициент неидеальности, характеризующего такого отклонения [2].

В работе [3] рассмотрены коэффициент неидеальности ВАХ диода, связанные с разогревом электронов в  $p-n$ -переходе под действием СВЧ поля. Коэффициент неидеальности ВАХ кремневого  $p-n$ -перехода в СВЧ поле были изучены в работе [4], где наблюдаены аномально большие токи и электродвижущие силы (ЭДС). Авторы связывают это явление с рекомбинационным процессом в области объемного заряда. В изученных образцах наблюдаены сильная связь коэффициента неидеальности от мощности разогреваемого СВЧ поля.

В работах [5] теоретически описан экспериментально обнаруженный в туннельном диоде эффект возникновения режима отрицательного дифференциального сопротивления и переключения (под действием внешнего СВЧ сигнала). Авторы видят причину наблюдаемого эффекта в существовании разброса в напряжениях смещения на диоде и уровнях мощностей СВЧ сигнала. А в работе [6] исследовано изменение фотоэлектрических характеристик кремниевых  $p-n$ -переходов в сильном СВЧ поле. Показано, что высота барьера  $p-n$ -перехода в сильном СВЧ поле и уменьшение барьера при освещении  $p-n$ -перехода пропорциональны высоте начального барьера, если последний уменьшен прямым

смещением. Вблизи нулевого смещения и при обратном смещении эта пропорциональность нарушается за счет влияния обратного тока через р-п-переход. Предложен механизм увеличения высоты барьера р-п-перехода, основанный на учете генерационно-рекомбинационных процессов в слое объемного заряда.

В работе [7] рассмотрены разогрев электронов и выпрямление тока в контакте, находящемся в переменном электромагнитном поле. Установлено, что электрическая составляющая сверхвысокочастотной (СВЧ) волны внутри р-п-перехода искривляется. Это приводит к возникновению перпендикулярной составляющей электрического поля СВЧ волны. Это составляющая модулирует высоту потенциального барьера с частотой СВЧ волны. В р-п-переходе возникает выпрямление СВЧ тока. Показано, что в выпрямляющем контакте, находящегося в электромагнитном сверхвысокочастотном поле всегда возникает электродвижущая сила. Это происходит за счет разогрева носителей тока и выпрямления СВЧ тока. Показано, что разогрев электронов и выпрямление СВЧ тока приведет к росту коэффициента неидеальности диода.

В работе [8] Исследовано влияние разогрева электронов и дырок на коэффициент неидеальности вольт-амперной характеристики р-п-перехода в сильном СВЧ поле. Установлено, что коэффициент неидеальности диода зависит от типа носителей заряда, создающего основной ток в р-п-переходе. Выявлено, что в некоторых случаях в кремниевых образцах, несмотря на то что температура электронов выше, чем дырок, коэффициент неидеальности диода определяется температурой дырок.

Однако, в вышеуказанных работах теоретически не исследовано влияние горячих носителей зарядов на коэффициент неидеальности ВАХ несимметричного р-п-перехода при освещении

Целью настоящей работы является теоретическое исследование влияния СВЧ поля и света на коэффициент неидеальности ВАХ р-п-перехода.

Когда на р-п-переход падает свет и он находится под действием малых мощностей СВЧ волны, которое не приводит к возмущению высоты потенциального барьера ( $I_{\phi} \neq 0$ ;  $T_e = T_h = T$ ;  $U_B = 0$ ), то из ВАХ для идеального диода имеет следующий вид [9]:

$$I = I_s \left( \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right) - eI_0(1 - \beta_0)$$

а для неидеального диода:

$$I = I_s \left( \exp\left(\frac{eU}{mkT}\right) - 1 \right).$$

Отсюда для коэффициента неидеальности  $m$  имеем

$$m = \frac{eU}{kT \ln\left(\frac{I}{I_s} + \frac{I_c}{I_s} + 1\right)} \quad (1)$$

При низких мощностях СВЧ волны под действием света и с учетом возмущений высоты потенциального барьера ток через определяется из следующего выражения [8]:

$$\bar{I} = \frac{eD_e n_p}{L_e} \left\{ \left( \frac{T_e}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left( \frac{e\varphi_0}{mkT} - \frac{e(\varphi_0 - U) + eU_B |\cos(\omega t)|}{mkT_e} \right) - 1 \right\} + \frac{eD_h p_n}{L_h} \left\{ \left( \frac{T_h}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left( \frac{e\varphi_0}{mkT} - \frac{e(\varphi_0 - U) + eU_B |\cos(\omega t)|}{mkT_h} \right) - 1 \right\} - I_c \quad (2)$$

где,  $I_{se} = \frac{eD_e n_p}{L_e}$ ;  $I_{sh} = \frac{eD_h p_n}{L_h}$  - токи насыщения для электронов и дырок;  $\varphi_0$  - высота потенциального барьера в отсутствие электромагнитной волны;  $\varphi = \varphi_0 - U$ ;  $U$  - возникающее напряжение на диоде;  $U_B = -\int_0^d E_B dx$  - переменное напряжение падающей волны, созданное на барьере диода;  $T$ -температура решетки;  $k$ - постоянная Больцмана;  $T_e$  и  $T_h$  - температуры электронов и дырок;  $E_B$ - напряженность электрического поля волны;  $e$ -заряд электрона;  $D_e$  и  $D_h$  - коэффициенты диффузии электронов и дырок,  $L_e$  и  $L_h$  - их длины диффузии;  $n_p$  и  $p_n$  - концентрации неосновных носителей заряда.

Когда  $T_e = T_h = T$ ;  $I_c \neq 0$ ;  $U_B \neq 0$  ток равен

$$\bar{I} = I_{se} \left\{ \exp \left( \frac{e(U - U_B |\cos(\omega t)|)}{mkT} \right) - 1 \right\} + I_{sh} \left\{ \exp \left( \frac{e(U - U_B |\cos(\omega t)|)}{mkT} \right) - 1 \right\} - I_c$$

$$\frac{I + I_c}{I_{se} + I_{sh}} + 1 = \exp \left( \frac{e(U - U_B |\cos(\omega t)|)}{mkT} \right)$$

отсюда получим следующее выражение для  $m$ :

$$m = \frac{e(U - U_B |\cos(\omega t)|)}{kT \ln \left( \frac{I + I_c}{I_{se} + I_{sh}} + 1 \right)} \quad (3)$$

При больших мощностях СВЧ волны ( $T_e \neq T_h > T$ ;  $I_c \neq 0$ ;  $U_B \neq 0$ ) следует пользоваться

формулой (2), когда  $\frac{p_p}{n_n} \gg 1$  основная доля тока определяется температурой дырок

$T_h$ , а  $m$  определяется из 2-го и 3-го члена этой формулы

$$\bar{I} = I_{sh} \left\{ \left( \frac{T_h}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left( \frac{e\varphi_0}{mkT} - \frac{e(\varphi_0 - U) + eU_B |\cos(\omega t)|}{mkT_h} \right) - 1 \right\} - I_c \quad (4)$$

$$\ln \left\{ \left( \frac{\bar{I} + I_c}{I_{sh}} + 1 \right) \left( \frac{T}{T_h} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} = \frac{e}{mk} \left( \frac{\varphi_0}{T} - \frac{(\varphi_0 - U) + U_B |\cos(\omega t)|}{T_h} \right)$$

$$m(T_h, T, U_B, I_\phi) = \frac{\frac{e}{k} \left( \frac{\varphi_0}{T} - \frac{(\varphi_0 - U) + U_B |\cos(\omega t)|}{T_h} \right)}{\ln \left( \frac{\bar{I} + I_c}{I_{sh}} + 1 \right) \left( \frac{T}{T_h} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

для кремниевых диодов

$$I_{sh} = \sqrt{\frac{ekT_h}{\tau_h} \cdot T^{3,7} \cdot 2,5 \cdot 10^8 \cdot \frac{1,5 \cdot 10^{33} \cdot e^{-\frac{\Delta\varepsilon}{kT}}}{n_n}}$$

где

При  $\frac{P_p}{n_n} \ll 1$  основной вклад в ток дает  $T_e$ , а  $m$  определяется из 1-го и 3-го

члена формулы (2)

$$\bar{I} = I_{se} \left\{ \left( \frac{T_e}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left( \frac{e\varphi_0}{mkT} - \frac{e(\varphi_0 - U) + eU_B |\cos(\omega t)|}{mkT_e} \right) - 1 \right\} - I_c$$

$$\ln \left\{ \left( \frac{\bar{I} + I_c}{I_{se}} + 1 \right) \left( \frac{T}{T_h} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} = \frac{e}{mk} \left( \frac{\varphi_0}{T} - \frac{(\varphi_0 - U) + U_B |\cos(\omega t)|}{T_e} \right)$$

$$m(T_e, T, U_B, I_\phi) = \frac{\frac{e}{k} \left( \frac{\varphi_0}{T} - \frac{(\varphi_0 - U) + U_B |\cos(\omega t)|}{T_e} \right)}{\ln \left( \frac{\bar{I} + I_c}{I_{se}} + 1 \right) \left( \frac{T}{T_e} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

$$I_{se} = \sqrt{\frac{ekT_e}{\tau_e} \cdot T^{3,4} \cdot 10^9 \cdot \frac{3 \cdot 10^{33} \cdot e^{-\frac{\Delta\varepsilon}{kT}}}{P_p}}$$

Кроме аналитических выражений (1), (3), (5), (6) и с учетом фототоков, пользуясь формулой (2):

$$\bar{I} = \frac{eD_e n_p}{L_e} \left\{ \left( \frac{T_e}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left( \frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - U)}{kT_e} \right) \int_0^{2\pi} \exp \left( - \frac{eU_B \cos(\omega t)}{kT_e} \right) \frac{d(\omega t)}{2\pi} - 1 \right\} +$$

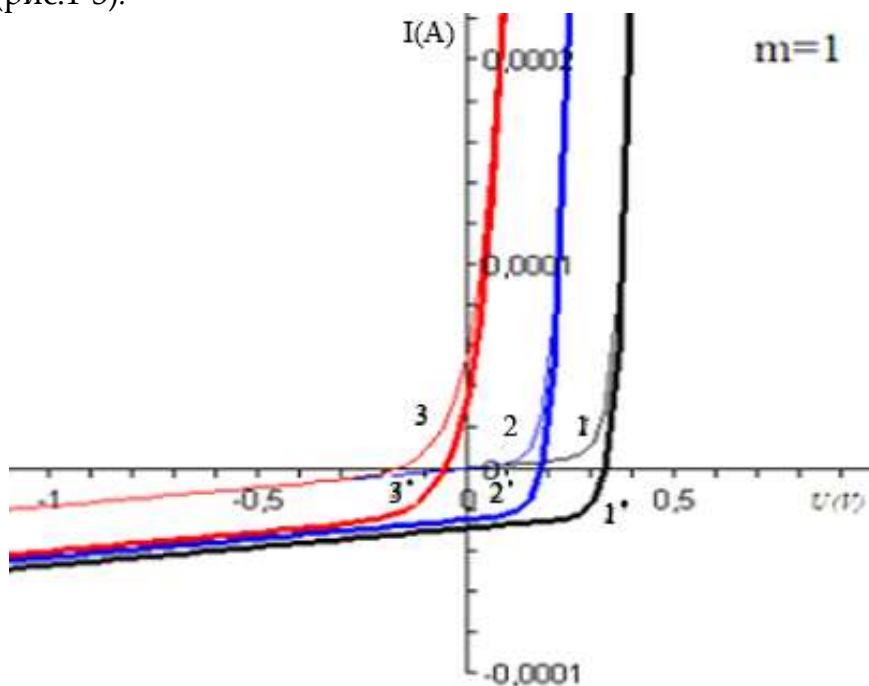
$$+ \frac{eD_h p_n}{L_h} \left\{ \left( \frac{T_h}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left( \frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - U)}{kT_h} \right) \int_0^{2\pi} \exp \left( - \frac{eU_B \cos(\omega t)}{kT_h} \right) \frac{d(\omega t)}{2\pi} - 1 \right\}. \quad (7),$$

для определения  $m$  получим следующее трансцендентное уравнение:

$$\bar{I} = \frac{eD_e n_p}{L_e} \left\{ \left( \frac{T_e}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left( \frac{e\varphi_0}{mkT} - \frac{e(\varphi_0 - U)}{mkT_e} \right) \int_0^{2\pi} \exp \left( - \frac{eU_B \cos(\omega t)}{mkT_e} \right) \frac{d(\omega t)}{2\pi} - 1 \right\} +$$

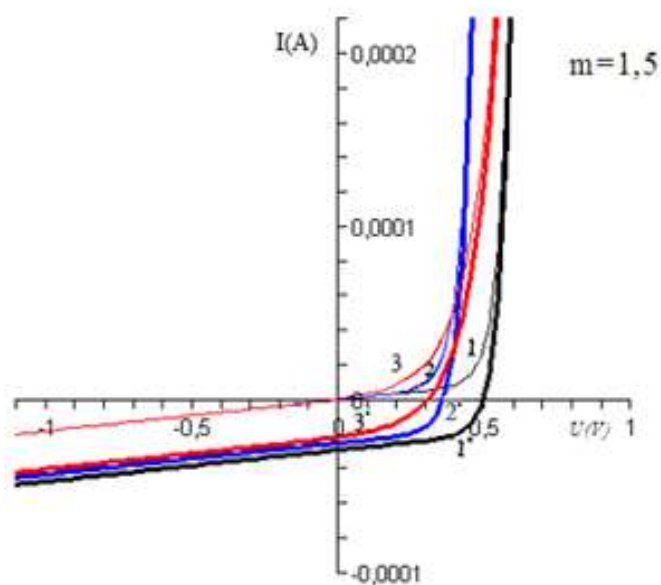
$$+ \frac{eD_h p_n}{L_h} \left\{ \left( \frac{T_h}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left( \frac{e\varphi_0}{mkT} - \frac{e(\varphi_0 - U)}{mkT_h} \right) \int_0^{2\pi} \exp \left( - \frac{eU_B \cos(\omega t)}{mkT_h} \right) \frac{d(\omega t)}{2\pi} - 1 \right\} - I_c \quad (8)$$

Это уравнение дает возможность представить ВАХ р-п-перехода при разных значениях  $m$  (рис.1-3).

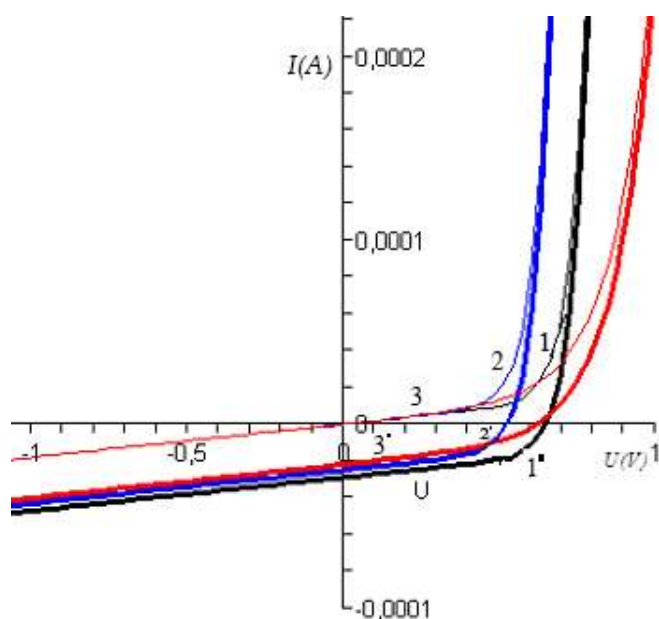


**Рис.1. Вольт-амперная характеристика р-п-перехода.** 1- без освещения и без СВЧ поля, 1`- при освещении и без СВЧ поля; 2- без освещения и при низких мощностях СВЧ волны, 2`- при освещении и при низких мощностях СВЧ волны; 3- без освещения и при больших мощностях СВЧ волны, 3`- при освещении и при больших мощностях СВЧ волны. и  $m=1$ .





**Рис.2. Вольт-амперная характеристика р-п-перехода.** 1- без освещения и без СВЧ поля, 1' - при освещении и без СВЧ поля; 2- без освещении и при низких мощностях СВЧ волны, 2' - при освещении и при низких мощностях СВЧ волны; 3- без освещения и при больших мощностях СВЧ волны, 3' - при освещении и при больших мощностях СВЧ волны и  $m=1.5$ .



**Рис.2. Вольт-амперная характеристика р-п-перехода.** 1- без освещения и без СВЧ поля, 1' - при освещении и без СВЧ поля; 2- без освещении и при низких мощностях СВЧ волны, 2' - при освещении и при низких мощностях СВЧ волны; 3- без освещения и при больших мощностях СВЧ волны, 3' - при освещении и при больших мощностях СВЧ волны. и  $m=2$ .

На основе проведенных исследований можно сделать следующий вывод:

Анализы графиков показывают, что изменение коэффициента неидеальности является более чувствительным, когда одновременно действует мощное СВЧ поле и

свет. Видно, что под действием СВЧ поля и света возникают на  $p$ - $n$ -переходе возникают рекомбинационные и генерационные процессы, которые сильно влияют на коэффициент неидеальности. Получено аналитическое выражение для коэффициента неидеальности ВАХ освещенного  $p$ - $n$ -перехода в сильном СВЧ поле. Сильное увеличение токов  $p$ - $n$ -перехода обусловлено тем, что разогрев увеличивает рекомбинационные токи в  $p$ - $n$ -переходе и освещение увеличивает генерационный ток в диоде. Так как генерационные и рекомбинационные токи направлены противоположно, то освещение образца приводит к смещению ВАХ  $p$ - $n$ -перехода в сторону меньших значений тока. Освещение уменьшает общий ток, проходящий через диод в сильном СВЧ поле.

#### References:

1. SHokli V. Teoriya elektricheskix poluprovodnikov. Per. s angl. Pod red. V. P.Juze. M., izd-vo inostr. lit., 1953.-186s.
2. Sah. C.T., Noyce. R.H., Shockly W. Carrier Generation and Recombination in  $p$ - $n$ -Junctions and  $p$ - $n$ -Junctions Characteristics// Proceedings of the IRE, 1957. -vol.45, №9. - pp.1228-1243.
3. Ashmontas S.P., Olekas A.P., SHirmulis E.I. Vliyanie razogreva nositeley zaryada na vid VAX  $p$ - $n$ -perexoda germaniya// Fizika i texnika poluprovodnikov.– Sankt Peterburg, 1985.- t.29. №5. -S. 807-809.
4. Ablyazimova N.A.,Veynger A.I., Pitanov V.Elektricheskie svoystva kremnievix  $r$ - $n$ -perexodov v silnix SVCH polyax// Fizika i texnika poluprovodnikov. – Leningrad, 1988.- t.22. № 11. – S. 2001-2007.
5. Usanov D.A., Skripal A.V., Kletsov A.A., Abramov A.V., Ilin S.N. Otritsatelnoe differensialnoe soprotivlenie N-tipa lavinno-proletnix diodov v silnom SVCH-pole// Izvestiya vuzov. Elektronika. Rossiya, 2003. №4. str.5–12.
6. N.A.Ablyazimova, A.I.Veynger, V.S.Pitanov. [Vliyanie silnogo SVCH polyax na fotoelektricheskie xarakteristiki kremnievix  \$p\$ - \$n\$ -perexodov// // Fizika i texnika poluprovodnikov.– Sankt Peterburg, 1992.- t.26. № 6. -S.1041-1047.](#)
- 7 Gulyamov G., Dadamirzaev M.G. Heating of the Electrons and the Rectified Current at the Contacts That Are in an Alternating Electromagnetic Field // World Journal of Condensed Matter Physics–USA, 2015, - Vol. 5, No.1, rr. 48-53.
- 8 Shamirzaev S.H., Gulyamov G., Dadamirzaev M.G., Gulyamov A.G. The Nonideality Coefficient of Current–Voltage Characteristics for  $p$ – $n$  Junctions in a High Ultrahigh-Frequec (Microwave) Field// Semiconductors. –USA, 2009. -vol. 43. №1. -pp. 47–51.
- 9 Pikus G.E. Osnovi teorii poluprovodnikovix priborov. -Moskva: Nauka, 1965. - 448s.