

# ЭДС ГОРЯЧИХ НОСИТЕЛЕЙ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ МОДУЛЯЦИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО ПОТЕНЦИАЛА В СИЛЬНОМ СВЧ ПОЛЕ.

ГУЛЯМОВ Г., ДАДАМИРЗАЕВ М.Г., БОЙДЕДАЕВ С.Р.

Наманганский инженерно-педагогический институт,  
716003 Наманган, Узбекистан.

Исследовано влияние искажения греющей волны на рекомбинационные токи и ЭДС, генерируемые р-п-переходом в сильном СВЧ поле. Показано, что высокочастотные возмущения поверхностного потенциала и высоты р-п-перехода греющей волной в режиме тока короткого замыкания приведет к уменьшению эффективной высоты барьера, а в режиме холостого хода к аномально большим значениям ЭДС.

ЭДС и токи возникающие в р-п-переходе помещенном в сильное СВЧ поле объясняются двумя взаимодополняющими механизмами. Первым механизмом является разогрев электронов и дырок под воздействием сильной СВЧ волны [1,2]. Вторым механизмом является искажение электрической составляющей напряженности электрического поля СВЧ волны  $E$  относительно первоначального направления  $\vec{E}_0$  [3,4]. Напряженность волны внутри образца меняет свое первоначальное

направление. Электрическую составляющую волны внутри диода можно разложить на перпендикулярную  $E_{\perp}$  и параллельную  $E_{\parallel}$  составляющие к поверхности образца.(рис.1) Основное воздействие параллельной составляющей  $E_{\parallel}$  сводится к разогреву электронов и дырок. Это учитывается через  $T_e$  и  $T_h$ . Перпендикулярная составляющая  $E_{\perp}$  участвует как в разогреве носителей заряда, так и изменяет высоты потенциального барьера р-п-перехода и величину поверхностного потенциала. Было показано, что модуляция высота барьера увеличивает токи и эдс р-п-перехода в сильном СВЧ поле [3]. Искаженная волна модулирует не только потенциал р-п-перехода  $\varphi$  но и поверхностный потенциал  $\varphi_s$ . Однако влияние модуляции поверхностного потенциала на токи и ЭДС генерируемую р-п-переходом в сильном СВЧ поле в литературе раньше не обсуждались. Целью настоящей работы является исследования влияния модуляции поверхностного потенциала на токи и ЭДС генерируемую р-п-переходом в СВЧ поле.

Появление перпендикулярной составляющей  $E_{\perp}$  будет модулировать высоту барьера р-п-перехода  $\varphi$  и поверхностного потенциала  $\varphi_s$  с частотой СВЧ волны:

$$\varphi = \varphi_0 + U_{-V} + U_{-V} \cos \omega t, \quad \varphi_s = \varphi_{s0} + U_{-s} \cos \omega t$$

Здесь  $\varphi$  - высота потенциального барьера р-п-перехода.  $\varphi_0$  - ее равновесное значение в отсутствии СВЧ поля.  $U_{-}$  - постоянное значение напряжения на р-

n-переходе.  $U_{\sim v}$  – амплитуда напряжения падающий на p-n-переход обусловленное  $E_{\perp}$ ,  $U_{\sim s}$  – напряжение падающее на поверхностный слой.

Зонная диаграмма p-n-перехода в СВЧ поле показано на рис.2. Эти напряжения связаны с  $E_{\perp}$  следующими соотношениями

$$U_{\sim v}(t) = \int_{-\ell_p}^{\ell_n} E_{\perp}(t) dx, \quad U_{\sim s}(t) = \int_{d-l}^d E_{\perp}(t) dx \quad (1)$$

Здесь  $\ell_p - \ell_n$  границы области объемного заряда.  $d - l \div d$  – область слоя объемного заряда. Как показано в работе [5] скорость поверхностной рекомбинации  $S$  сильно зависит от температур носителей заряда и поверхностного потенциала  $\varphi_s$ . Ток  $j$  в сильном СВЧ поле определяется соотношением

$$j(U, T_e, T_h) = e \frac{D_p p_n}{L_p} F_h(U, T_h) + \frac{e s n_p}{1 + \frac{d}{L_s}} F_e(U, T_e) + \frac{e q_s^0}{1 + \frac{d}{L_s}} \quad (2)$$

**Здесь**

$$F_h(U, T_h) = \exp\left(\frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - U)}{kT_h}\right) - 1, \quad F_e(U, T_e) = \exp\left(\frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - U)}{kT_e}\right) - 1,$$

остальные обозначения общепринятые и соответствует работам [3,4].

При  $\Delta n \ll p_0 + n_0$  скорость поверхностной рекомбинации имеет вид:

$$S = \frac{N_s \gamma_{1s} \gamma_{2s} (p_0 + n_0) \exp\left(\frac{e\varphi_s}{k} \left(\frac{1}{T_h} - \frac{1}{T_e}\right)\right)}{\gamma_{1s} n_1 + \gamma_{2s} p_1 + F_{es}(\gamma_{1s}, U, T_e) + F_{hs}(\gamma_{2s}, U, T_h)} \quad (3)$$

Здесь

$$F_{es}(\gamma_{1s}U, T_e) = \gamma_{1s}n_0 \exp\left(\frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - U)}{kT_e}\right),$$

$$F_{hs}(\gamma_{2s}U, T_h) = \gamma_{2s}p_0 \exp\left(\frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - U)}{kT_h} + \frac{e\varphi_0}{kT_h}\right)$$

Отсюда следует, что скорость поверхностной рекомбинации сильно зависит от поверхностного потенциала  $\varphi_s$ . В выражении для темнового тока (2) участвует как скорость поверхностной рекомбинации так и  $U=U_{-} + U_{-}\cos\omega t$  напряжение падающее на р-п-переход. Таким образом, искажение СВЧ волны приведет к изменению высоты барьера р-п-перехода и поверхностного потенциала. Это изменение высоты барьеров создает большой переменный ток через диод. Средний ток через диод определяется соотношением

$$\bar{j} = \frac{1}{T_{-}} \int_0^{T_{-}} j_r(U, T, T_e, U_{-v}, U_{-s}) dt = \bar{j}_r + \frac{e\bar{s}n_p}{1 + \frac{d}{L_s}} \bar{F}_e(U, T_e) + \frac{e\bar{q}_s^0}{1 + \frac{d}{L_s}} \quad (4)$$

Здесь  $\bar{j}_r$  – ток рекомбинации в р-п- переходе и

$$\bar{F}_e(U, T_e) = \exp\left(\frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - U - \bar{U}_{-v})}{kT_e}\right) - 1$$

Для получения последнего выражения использована теорема о среднем значении [4]. В этом выражении  $\bar{s}$  определяется соотношением:

$$\bar{S} = \frac{N_s \gamma_{1s} \gamma_{2s} (p_0 + n_0) \exp\left(\frac{e(\varphi_{s0} + \bar{U}_s)}{k} \left(\frac{1}{T_h} - \frac{1}{T_e}\right)\right)}{\gamma_{1s} n_1 + \gamma_{2s} p_1 + \bar{F}_{es}(\gamma_{1s}, \bar{U}, T_e) + \bar{F}_{hs}(\gamma_{2s}, \bar{U}, T_h)} \quad (5)$$

Здесь

$$\bar{F}_{es}(\gamma_{1s}, \bar{U}, T_e) = \gamma_{1s} n_0 \exp\left(\frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - U_- - \bar{U}_{\sim v})}{kT_e}\right),$$

$$\bar{F}_{hs}(\gamma_{2s}, \bar{U}, T_h) = \gamma_{2s} p_0 \exp\left(\frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - U_- - \bar{U}_{\sim s})}{kT_h} + \frac{e\varphi_{s0}}{kT_h}\right).$$

При  $U_- = 0$  мы получаем ток короткого замыкания через диод:

$$j_{кз} = \bar{j}_r + \frac{e\bar{s}(U=0)n_p}{1 + \frac{d}{L_s}} \left( \exp\left(\frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - \bar{U}_{\sim v})}{kT_e}\right) - 1 \right) + \frac{e\bar{q}_s^0}{1 + \frac{d}{L_s}} \quad (6)$$

Когда поверхностная рекомбинация больше объемной первым членом (6) можно пренебречь. Из выражения (6) следует, что зависимость тока короткого замыкания от обратной температуры носителей может определить эффективную высоту барьера р-п-перехода. Тогда для эффективной высоты потенциального барьера получим следующее выражение  $\varphi_0 - \bar{U}_{\sim v}$ . Отсюда следует, что в режиме короткого замыкания модуляция высоты барьера оказывает воздействие как эффективное уменьшение высоты потенциального барьера. В работе [8] из зависимости тока короткого замыкания от обратной температуры электронов определялась эффективная высота барьера. Результаты измерений в режиме короткого замыкания показали, что величина эффективной высоты потенциального барьера р-п-перехода примерно в два раза меньше его истинной величины  $\varphi_0$ . Таким образом, колебания высоты барьера р-п-перехода и поверхностного потенциала, приводит к эффективному уменьшению высоты барьера р-п-перехода

$\varphi_0 - \bar{U}_{\sim v}$ . Следовательно как рекомбинация в области р-п-перехода, так и поверхностная рекомбинация при модуляции высоты барьера р-п-перехода и высота поверхностного потенциала приводит к эффективному уменьшению высоты барьера р-п-перехода и поверхностного потенциала, а также к увеличению тока короткого замыкания. Модуляция поверхностного потенциала увеличивает токи генерации и рекомбинации. Это легко можно увидеть из (4). Когда меняется высота барьера р-п-перехода  $\varphi$  и поверхностный потенциал  $\varphi_s$  согласовано с волной, скорость поверхностной рекомбинации сильно увеличивается. Это приводит к резкому росту прямого и обратного тока р-п-перехода. В экспериментах [7,8] при воздействии сильного СВЧ поля действительно наблюдается сильный рост как прямого, так и обратного тока. Из (4) увеличение прямых и обратных токов также можно объяснить модуляцией потенциального барьера р-п-перехода и поверхностного потенциала.

Проанализируем напряжение холостого хода, генерируемое р-п-переходом в сильном СВЧ поле. Напряжение холостого хода получится из условия равенства (4) нулю. Для простоты рассмотрим случай  $T_e = T_h$ , тогда для  $U_{xx}$  получим:

$$U_{xx} = -\left(\frac{T_e}{T} - 1\right)\varphi_0 - \bar{U}_{\sim v} + \frac{kT_e}{e} \ln\left(1 + \frac{e\bar{q}_s^0 / (1 + d/L_s)}{j_s + en_p\bar{s} / (1 + d/L_s)}\right) \quad (7)$$

В этом выражении первый член  $-(T_e/T-1)\varphi_0$  соответствует ЭДС генерируемая р-п-переходом за счет разогрева носителей. Второй и третий члены обусловлены рекомбинацией носителей заряда на поверхности и модуляцией поверхностного потенциала. Из выражения (7) следует, что модуляция высоты барьера р-п-перехода и поверхностного потенциала  $\varphi_s$  сильно увеличивает ЭДС генерируемую р-п-переходом в сильном СВЧ поле. Как видно из (7) ЭДС может генерироваться даже в отсутствии разогрева за счет модуляции высоты барьера р-п-перехода и поверхностного потенциала. С ростом мощности СВЧ волны ЭДС может принимать аномально большие значения. Повидимому аномально большие значения ЭДС генерируемой р-п-переходом в СВЧ поле даже в слабом разогреве, обнаруженные в работах [7,8], обусловлены модуляцией высоты барьера СВЧ волной и рекомбинацией носителей на поверхностных состояниях. На основе проведенных исследований можно сделать следующий вывод: модуляция поверхностного потенциала обусловленная искажением СВЧ волны в режиме короткого замыкания приведет к уменьшению эффективной высоты барьера, а в режиме холостого хода приведет к аномально большому значению. ЭДС генерируемое р-п-переходом даже в слабом разогреве.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вейнгер А.И., Парицкий Л.Г., Акопян Э.А., Дадамирзаев Г. Термоэдс горячих носителей тока на р-п-переходе. –ФТП, 1975, т.9, в.2, с.216-224. (27д)
- [2] Ашмонтас С.П. Электроградиентные явления в полупроводниках.
- [3] Гулямов Г. ЭДС кремниевых р-п-переходах в сильных СВЧ полях. ФТП. 1996, т.30, в.7, с.1279-1284.
- [4] Гулямов Г., Б.Хамидова. Влияние геометрии образцов на ВАХ р-п-перехода в сильном СВЧ поле. ФТП. 1996, т.30, в.5, с.169-777.
- [5] Гулямов Г. Влияние поверхностной рекомбинации на ВАХ р-п-перехода в сильном СВЧ поле. ФТП, 1996, т.30, в.3, с.569-574.
- [6] Смирнов В.И. Курс высшей математики, т.1, М.:Наука,1974,с.480.
- [7] Аблязимова Н.А., Вейнгер А.И., Питанов.В.С. Влияние сильного СВЧ поля на фотоэлектрические характеристики кремниевых р-п-переходов.- ФТП, 1992, т.26, вып.6, с.1041-1047.
- [8] Аблязимова Н.А., Вейнгер А.И., Питанов.В.С. Электрические свойства кремниевых р-п-переходов в сильных СВЧ полях.-ФТП, 1988, т.22, в.11, с.2001-2007.

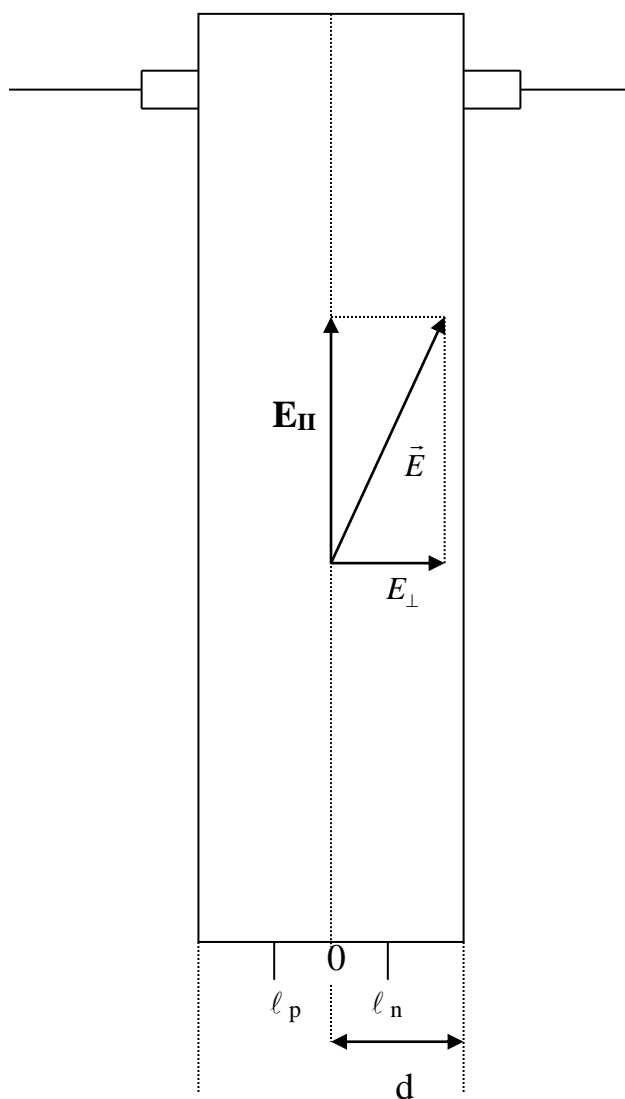


Рис.1 Появление перпендикулярной составляющей напряженности электрического поля волны за счет ее искажение.  $E_{\parallel}$  –параллельная составляющая напряженности электрического поля.  $E_{\perp}$ - перпендикулярная составляющая напряженности электрического поля.

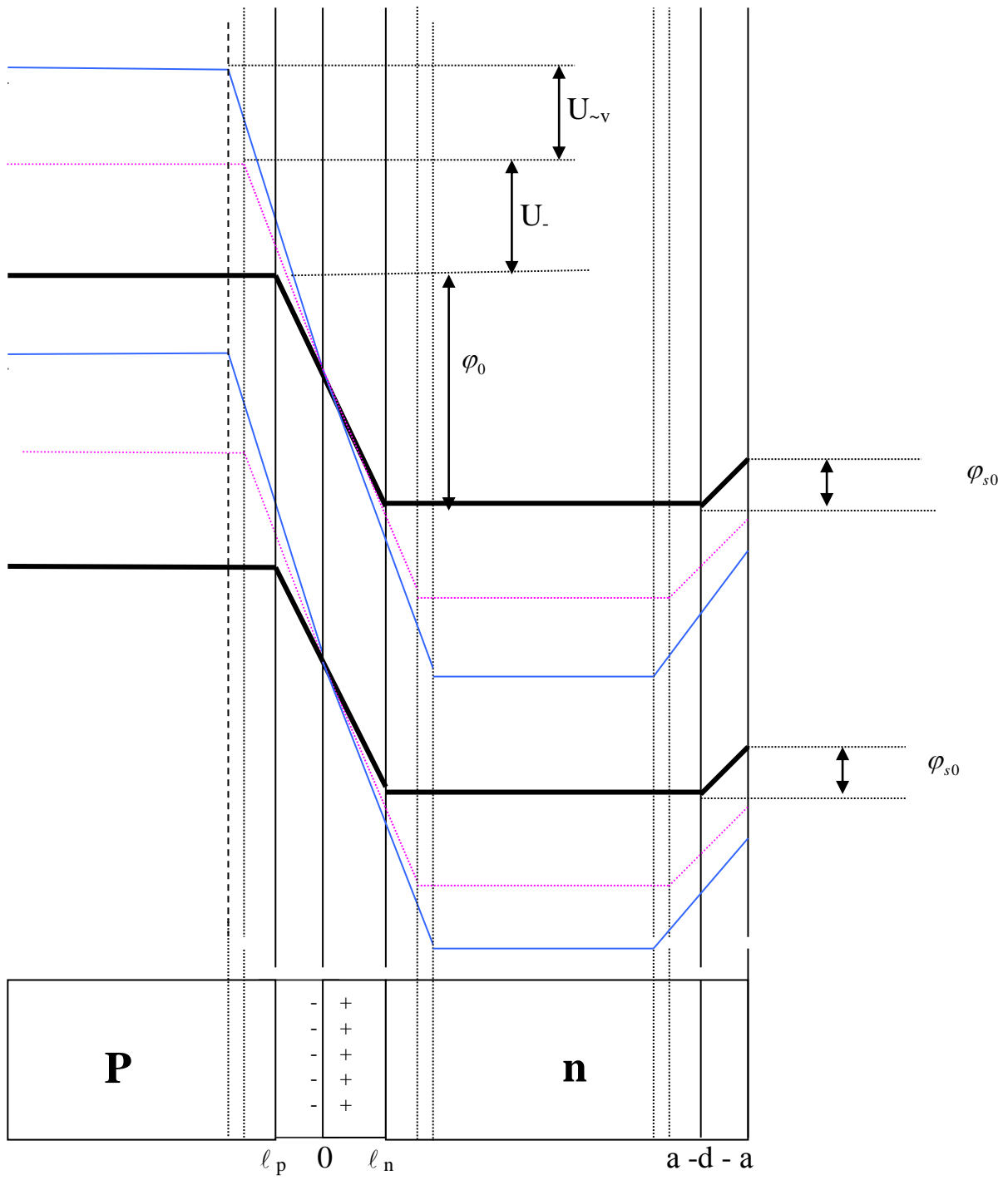


Рис.2. Зонная диаграмма p-n-перехода помещенное в сильное СВЧ поле .

ЭДС ГОРЯЧИХ НОСИТЕЛЕЙ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ МОДУЛЯЦИЙ  
ПОВЕРХНОСТНОГО ПОТЕНЦИАЛА В СИЛЬНОМ СВЧ ПОЛЕ.

ГУЛЯМОВ Г., ДАДАМИРЗАЕВ М.Г., БОЙДЕДАЕВ С.Р.

Наманганский инженерно-педагогический институт,  
716003 Наманган, Узбекистан.

АННОТАЦИЯ

Исследовано влияние искажения греющей волны на рекомбинационные токи и ЭДС, генерируемые р-n-переходом в сильном СВЧ поле. Показано, что высокочастотные возмущения поверхностного потенциала и высоты р-n-перехода греющей волной в режиме тока короткого замыкания приведет к уменьшению эффективной высоты барьера, а в режиме холостого хода к аномально большим значениям ЭДС.

THE EMF OF HOT CARRIERS, CAUSED MODULATION OF SURFACE  
POTENTIAL IN STRONG MICROWAVE FIELDS.

GULYAMOV G, DADAMIRZAEV M.G., BOYDADAEV S. R.

Abstract

Namangan Engineering-pedagogical institute,  
716003 Namangan, Uzbekistan.

It is investigated influence of distortion heating waves on recombination currents and EMF generated by p-n-junction in strong microwave fields. It is shown that radiofrequency outraging surface potential and height of barrier of p-n-junction heating wave in the conditions of current of short circuit decrease on effective height of barrier, but in the condition of idling to anomalous large values EMF.