

# Эдс горячих носителей, обусловленная модуляцией поверхностного потенциала в сильном СВЧ поле

© Г. Гулямов, М.Г. Дадамирзаев, С.Р. Бойдедаев

Наманганский инженерно-педагогический институт,  
716003 Наманган, Узбекистан

(Получена 6 сентября 1999 г. Принята к печати 7 декабря 1999 г.)

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

Токи и эдс, возникающие в  $p-n$ -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  $\mathbf{E}$  — изменение направления внутри образца относительно первоначального направления  $\mathbf{E}_0$  [3,4]. Электрическое поле волны внутри диода можно разложить на перпендикулярную ( $E_{\perp}$ ) и параллельную ( $E_{\parallel}$ ) составляющие по отношению к поверхности образца (рис. 1). Основное воздействие параллельной составляющей  $E_{\parallel}$  сводится к разогреву электронов и дырок. Это учитывается через соответствующие температуры  $T_e$  и  $T_h$ . Перпендикулярная составляющая  $E_{\perp}$  как участвует в разогреве носителей заряда, так и изменяет высоту потенциального барьера  $p-n$ -перехода и величину поверхностного потенциала. Было показано, что модуляция высоты барьера в сильном СВЧ поле увеличивает токи и эдс  $p-n$ -перехода [3]. Волна модулирует не только потенциал  $p-n$ -перехода  $\varphi$ , но и поверхностный потенциал  $\varphi_s$ . Однако влияние модуляции поверхностного потенциала на токи и эдс, генерируемую на  $p-n$ -переходе в сильном СВЧ поле, в литературе раньше не обсуждалось. Цель настоящей работы — исследование влияния модуляции поверхностного потенциала на токи и эдс, генерируемую на  $p-n$ -переходе в СВЧ поле.

Перпендикулярная составляющая  $E_{\perp}$  будет модулировать высоту барьера  $p-n$ -перехода  $\varphi$  и поверхностный потенциал  $\varphi_s$  с частотой СВЧ волны:

$$\varphi = \varphi_0 + U_{\sim v} + U_{\sim v} \cos \omega t, \quad \varphi_s = \varphi_{s0} + U_{\sim s} \cos \omega t.$$

Здесь  $\varphi$  — высота потенциального барьера  $p-n$ -перехода,  $\varphi_0$  — ее равновесное значение в отсутствие СВЧ поля;  $U_{\sim v}$  — постоянное напряжение на  $p-n$ -переходе;  $U_{\sim v}$  — амплитуда переменного напряжения, падающего на  $p-n$ -переходе, обусловленного  $E_{\perp}$ ;  $U_{\sim s}$  — переменное напряжение, падающее на поверхностном слое. Зонная диаграмма  $p-n$ -перехода в СВЧ поле показана на рис. 2. Напряжения связаны с  $E_{\perp}$

следующими соотношениями:

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

Здесь  $l_p, l_n$  — границы области объемного заряда  $p-n$ -перехода,  $(d-l), d$  — области объемного заряда вблизи

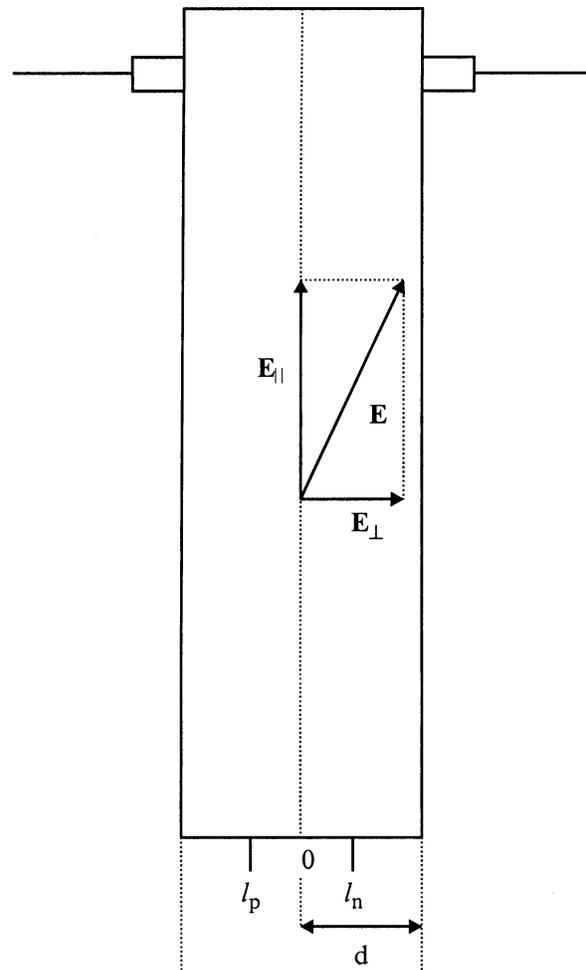


Рис. 1. Появление перпендикулярной составляющей напряженности электрического поля волны.

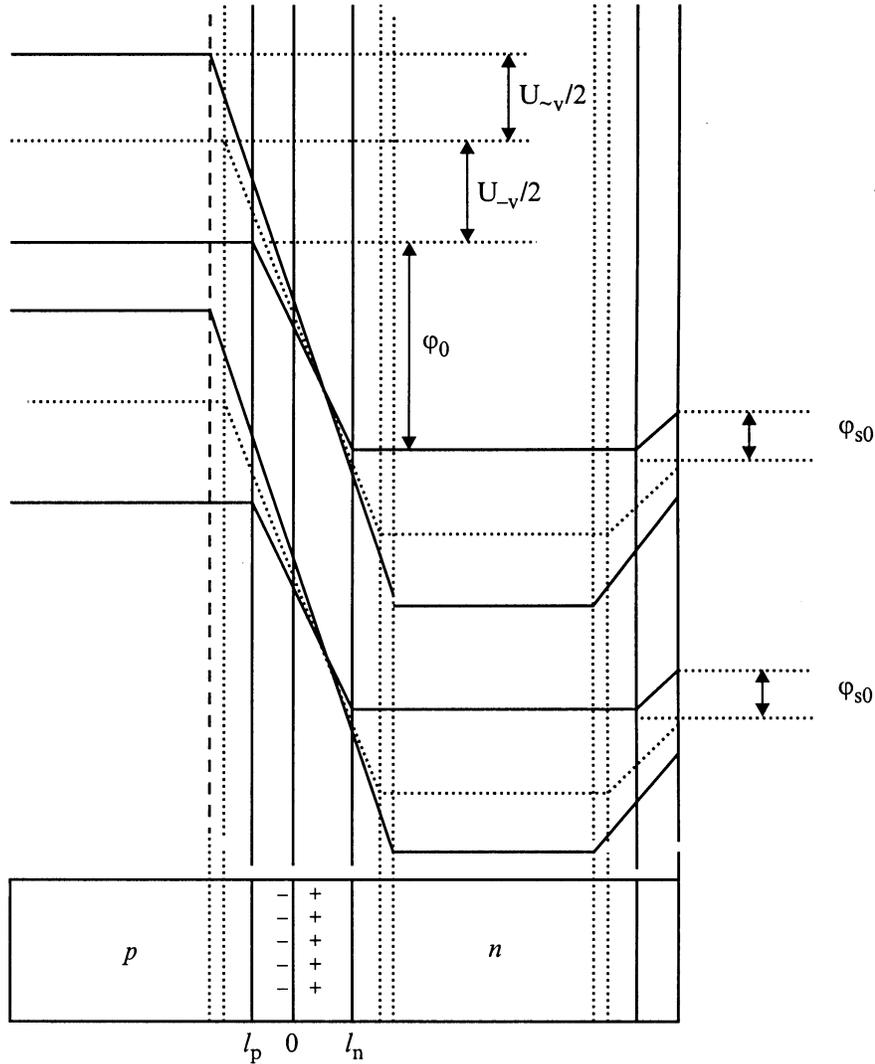


Рис. 2. Зонная диаграмма  $p-n$ -перехода в сильном СВЧ поле.

поверхности. 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

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

Здесь

$$F_h(U, T_h) = \exp \left[ \frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - U)}{kT_h} \right] - 1,$$

$$F_e(U, T_e) = \exp \left[ \frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - U)}{kT_e} \right] - 1,$$

остальные обозначения — общепринятые и соответствуют используемым в работах [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) участвуют как скорость поверхностной рекомбинации, так и  $U = U_{\sim\nu} + U_{\sim\nu} \cos \omega t$  — напряжение, падающее на  $p-n$ -переходе. Таким образом, искажение СВЧ волны приведет к изменению высоты барьера  $p-n$ -перехода и поверхностного потенциала. Это изменение высот

барьеров создает большой переменный ток через диод. Средний ток через диод определяется соотношением

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

Здесь  $j_r$  — ток рекомбинации в  $p$ - $n$ -переходе и

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

Для получения последнего выражения использована теорема о среднем значении [6]. В этом выражении  $\bar{S}$  определяется соотношением

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

Здесь

$$\begin{aligned} \bar{F}_{es}(\gamma_{1s}, \bar{U}, T_e) &= \gamma_{1s} n_0 \exp \left[ \frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - U_{\sim v} - \bar{U}_{\sim v})}{kT} \right], \\ \bar{F}_{hs}(\gamma_{2s}, \bar{U}, T_h) &= \gamma_{2s} p_0 \exp \left[ \frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - U_{\sim v} - \bar{U}_{\sim s})}{kT_h} + \frac{e\varphi_{s0}}{kT_h} \right]. \end{aligned}$$

При  $U_{\sim v} = 0$  мы получаем ток короткого замыкания через диод

$$\begin{aligned} j_{sc} &= \bar{j}_r + \frac{e\bar{S}(U=0)n_p}{1+d/L_s} \\ &\times \left\{ \exp \left[ \frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - \bar{U}_{\sim v})}{kT_e} \right] - 1 \right\} + \frac{e\bar{q}_s^0}{1+d/L_s}. \end{aligned} \quad (6)$$

Когда поверхностная рекомбинация больше объемной, первым членом в (6) можно пренебречь. Из выражения (6) следует, что зависимость тока короткого замыкания от обратной температуры носителей определяется эффективной высотой барьера  $p$ - $n$ -перехода. Тогда для эффективной высоты потенциального барьера получим выражение  $\varphi_0 - \bar{U}_{\sim v}$ . Отсюда следует, что в режиме короткого замыкания модуляции высоты барьера оказывает воздействие как эффективное уменьшение высоты потенциального барьера. В работах [7,8] 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  $p$ - $n$ -перехода примерно в 2 раза меньше его истинной величины  $\varphi_0$ . Таким образом, колебания высоты барьера  $p$ - $n$ -перехода и поверхностного потенциала приводят к эффективному уменьшению высоты

барьера  $p$ - $n$ -перехода. Следовательно, как рекомбинация в области  $p$ - $n$ -перехода, так и поверхностная рекомбинация при модуляции высоты барьера  $p$ - $n$ -перехода и высоты поверхностного потенциала приводят к эффективному уменьшению высоты барьера  $p$ - $n$ -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  $p$ - $n$ -перехода  $\varphi$  и поверхностный потенциал  $\varphi_s$ , согласованно с волной, скорость поверхностной рекомбинации сильно увеличивается. Это приводит к резкому росту прямого и обратного токов  $p$ - $n$ -перехода. В экспериментах [7,8] при воздействии сильного СВЧ поля действительно наблюдается сильный рост как прямого, так и обратного токов. Из (4) следует, что увеличение прямых и обратных токов можно объяснить модуляцией потенциального барьера  $p$ - $n$ -перехода и поверхностного потенциала.

Проанализируем напряжение холостого хода  $U_{oc}$ , генерируемое на  $p$ - $n$ -переходе в сильном СВЧ поле. Напряжение холостого хода можно получить из условия (4) нулю. Для простоты рассмотрим случай  $T_e = T_h$ . Тогда получим

$$\begin{aligned} U_{oc} &= - \left( \frac{T_e}{T} - 1 \right) \varphi_0 - \bar{U}_{\sim v} \\ &+ \frac{kT_e}{e} \ln \left[ 1 + \frac{e\bar{q}_s^0 / (1+d/L_s)}{j_s + en_p \bar{S} / (1+d/L_s)} \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

В этом выражении первый член  $-(T_e/T - 1)\varphi_0$  соответствует эдс, генерируемой на  $p$ - $n$ -переходе 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  $p$ - $n$ -перехода и поверхностного потенциала сильно увеличивает эдс. Как видно из (7), эдс может генерироваться даже в отсутствие разогрева, только за счет модуляции высоты барьера  $p$ - $n$ -перехода и поверхностного потенциала. С ростом мощности СВЧ волны эдс может принимать anomalно большие значения. По-видимому, anomalно большие значения эдс, генерируемой на  $p$ - $n$ -переходе в СВЧ поле даже при 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 приводит к уменьшению эффективной высоты барьера, а в режиме холостого хода приводит к anomalно большим значениям эдс, генерируемой на  $p$ - $n$ -переходе даже при слабом разогреве.

## Список литературы

- [1] А.И. Вейнгер, Л.Г. Парицкий, Э.А. Акопян, Г. Дадамйрзаев. ФТП, **9** (2), 216 (1975).
- [2] С.П. Ашмонтас. *Электроградиентные явления в полупроводниках* (Вильнюс, Москлас, 1984).
- [3] Г. Гулямов. ФТП, **30** (7), 1279 (1996).
- [4] Г. Гулямов, Б. Хамидова. ФТП, **30** (5), 169 (1996).
- [5] Г. Гулямов. ФТП, **30** (3), 569 (1996).
- [6] В.И. Смирнов. *Курс высшей математики* (М., Наука, 1974) т. 1, с. 480.
- [7] Н.А. Аблязимова, А.И. Вейнгер, В.С. Питанов. ФТП, **26** (6), 1041 (1992).
- [8] Н.А. Аблязимова, А.И. Вейнгер, В.С. Питанов. ФТП, **22** (11), 2001 (1988).

*Редактор Л.В. Шаронова*

## The EMF of hot carriers caused by modulation of the surface potential in a high microwave field

G. Gulyamov, M.G. Dadamirzaev, S.R. Boydadaev

Engineering-Pedagogical Institute,  
716003 Namangan, Uzbekistan

**Abstract** A study has been done on the influence of the heating wave distortion on recombination currents and the EMF generated by  $p-n$ -junctions in a high microwave field. It is shown that radiofrequency disturbances of the surface potential as well as the height of the  $p-n$ -junction barrier by the heating wave under conditions of the short circuit results in decreasing the effective height of the barrier; while under open circuits conditions anomalous large values of EMF are observed.