

# Вихревые токи, возникающие на $p-n$ -переходе в сверхвысокочастотном электромагнитном поле

© С.Х. Шамирзаев<sup>+</sup>, Г. Гулямов<sup>\*,†</sup>, М.Г. Дадамирзаев<sup>\*,+</sup>, А.Г. Гулямов<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Наманганский инженерно-педагогический институт,  
716003 Наманган, Узбекистан

<sup>†</sup> Физико-технический институт Академии наук Республики Узбекистан,  
700084 Ташкент, Узбекистан

(Получена 24 февраля 2009 г. Принята к печати 3 марта 2009 г.)

Исследовано возникновение вихревых токов на  $p-n$ -переходе в сверхвысокочастотном поле. Показано, что вихревые токи уменьшают термоэдс горячих носителей в диоде. Выделена формула, учитывающая размеры образца при вычислении токов на  $p-n$ -переходе в сверхвысокочастотном поле.

PACS: 72.30.+q, 73.40.Lq, 73.50.Fq, 73.50.Gr

## 1. Введение

В опытах [1,2] по исследованию горячих носителей тока в кремниевых  $p-n$ -переходах в сильном сверхвысокочастотном (СВЧ) поле были обнаружены трудно объяснимые аномально большие значения токов и напряжений. Полученные вольт-амперные характеристики (ВАХ) этих диодов также сильно отличаются от идеальных даже в относительно слабых СВЧ полях, когда еще не заметен разогрев носителей. При анализе экспериментальных результатов не учитывалось, что часть образца находится вне волновода и в этих участках носители тока имеют температуру окружающей среды, а внутри волновода они находятся в сильном СВЧ поле и разогреваются. В работе [3] проделаны теоретические расчеты ВАХ и коэффициента неидеальности  $p-n$ -перехода с учетом условий эксперимента [1,2] и реальной геометрии образца. Кроме того, предложены дополнительные объяснения возникновения аномально больших токов, электродвижущей силы (эдс) и коэффициента неидеальности диода. Если в образце имеется анизотропия, то в нем, кроме обычных термоэлектрических явлений, возникают вихревые токи, которые сильно влияют на эдс и токи, генерируемые в анизотропном термоэлементе [4].

Механизмы возникновения эдс и токов в  $p-n$ -переходах в сильных СВЧ полях в импульсном режиме подробно исследованы в работах [5,6].

В работе [7] изучено влияние разогрева электронов и дырок на коэффициент неидеальности ВАХ  $p-n$ -перехода в сильном СВЧ поле. Установлено, что коэффициент неидеальности диода определяется температурой носителей заряда, создающего основной ток в  $p-n$ -переходе. Однако там не учитывается влияние вихревого тока, возникающего в образцах с  $p-n$ -переходом в СВЧ поле.

Цель данной работы заключается в изучении влияния вихревого тока, возникающего в СВЧ поле, на характеристики  $p-n$ -перехода и действия его на генерируемый в образце ток.

## 2. Вихревые токи горячих носителей заряда на $p-n$ -переходе в сверхвысокочастотном электромагнитном поле

Анализ токов с учетом геометрии образцов, исследованных экспериментально [1,2], схематически представлен на рис. 1.

Нижняя часть образца расположена внутри волновода, где носители заряда разогреваются под действием СВЧ поля и возникают токи разогретых электронов и дырок в области диода  $l_1-l$ . Кроме того, в таких образцах под действием СВЧ поля возникают вихревые токи (рис. 2 и 3). Эти токи действуют на эдс, генерируемую на  $p-n$ -переходе.

Полный ток, проходящий через диод, определяется по формуле [3]

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - U)}{kT_e}\right) - 1 \right] \frac{l - l_1}{l} + \frac{l_1}{l} I_s \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]. \quad (1)$$

Здесь  $I_s$  — ток насыщения,  $\varphi_0$  — высота потенциального барьера в отсутствие электромагнитной волны,  $U$  — возникающее напряжение на диоде,  $e$  — заряд электрона,  $T$  — температура решетки,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T_e$  — температура электронов. Эта формула справедлива, когда падение напряжения в базе не учитывается.

Второй член этой формулы выражает ток, проходящий через часть диода, находящуюся вне волновода.

Первый член — ток в части диода внутри волновода соответствует случаю, когда сопротивление базы  $p-n$ -перехода равно нулю. Для этого случая ток короткого замыкания  $I_{sc}$  определяется током разогретых электронов:

$$I_{sc} = I_s \left[ \exp\left(\frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e\varphi_0}{kT_e}\right) - 1 \right] \frac{l - l_1}{l}. \quad (2)$$

Эта формула не учитывает модуляцию высоты потенциального барьера.

<sup>†</sup> E-mail: Gulyamov1949@rambler.ru

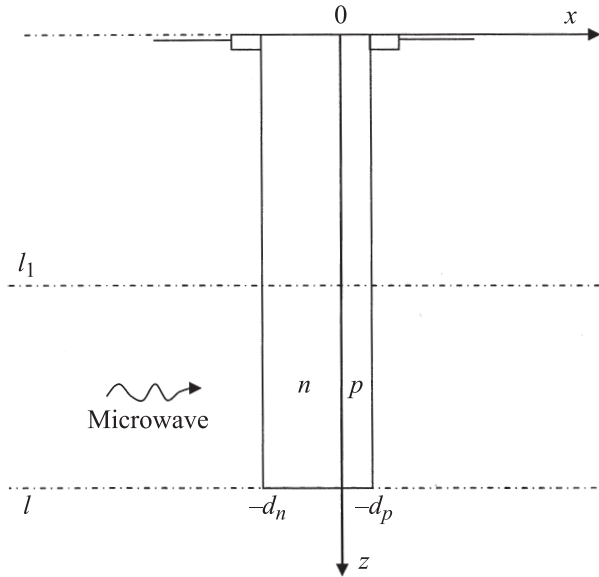


Рис. 1. Расположение  $p-n$ -перехода в волноводе [2].

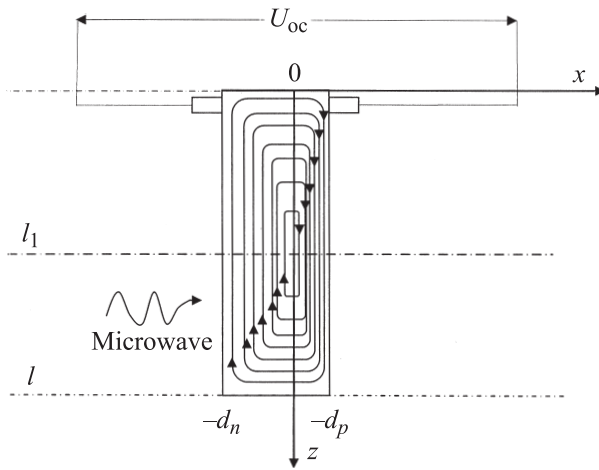


Рис. 2. Распределение вихревых токов в образце в режиме холостого хода.

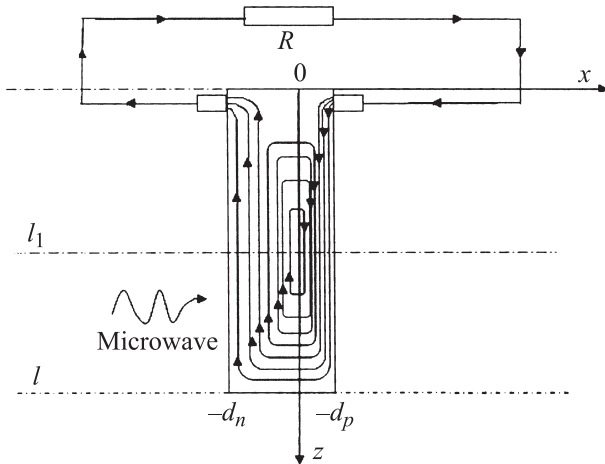


Рис. 3. Распределение вихревых токов в образце при подсоединении к  $p-n$ -переходу внешней нагрузки.

Рассмотрим напряжение холостого хода для случая, когда сопротивление базы намного меньше, чем сопротивление  $p-n$ -перехода. В этом случае полный ток во внешнем контуре равен нулю. Тогда, приравнявая уравнение (1) к нулю, имеем

$$I_s \left[ \exp\left(\frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - U_{0c})}{kT_e}\right) - 1 \right] \frac{l - l_1}{l} + \frac{l_1}{l} I_s \left[ \exp\left(\frac{eU_{0c}}{kT}\right) - 1 \right] = 0, \quad (3)$$

где  $U_{0c}$  — напряжение холостого хода. Для простоты рассмотрим случай, когда  $(l - l_1)/l = 1/2$ , и если предположить, что  $I_s(T_e) = I_s(T)$ , то для напряжения холостого хода  $U_{0c}$  возникает следующее соотношение:

$$\exp\left(\frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - U_{0c})}{kT_e}\right) - \exp\left(\frac{eU_{0c}}{kT}\right) = 2.$$

Нас интересует случай, когда  $eU_{0c} > kT_e$ , тогда для напряжения холостого хода получим формулу

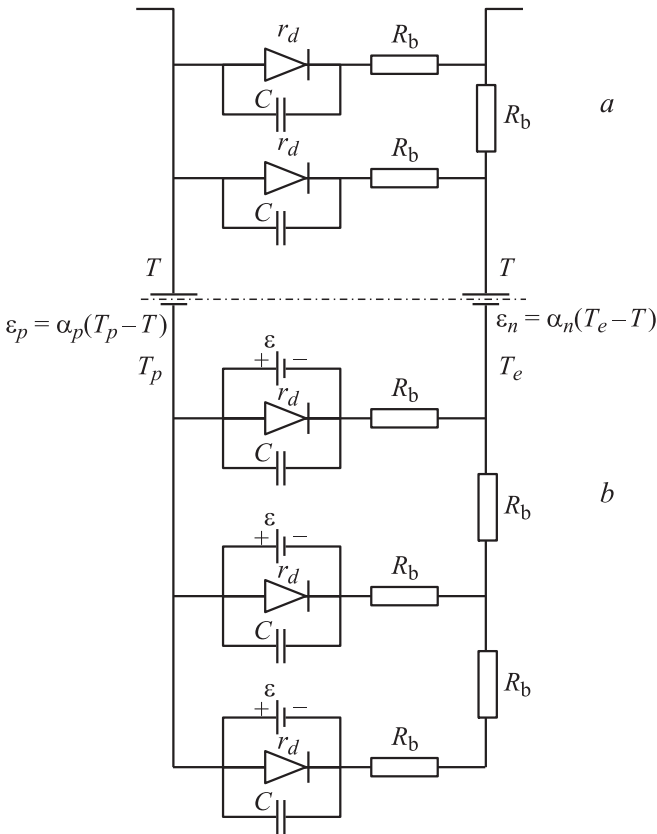
$$U_{0c} = -\left(\frac{T_e}{T} - 1\right)\varphi_0 + \frac{kT_e}{e} \ln 2. \quad (4)$$

Отсюда видно, что вихревые токи уменьшают напряжение холостого хода на величину  $(kT_e/e) \ln 2$ .

При подсоединении  $p-n$ -перехода к внешней нагрузке изменяется форма и плотность вихревых токов, распределение которых показано на рис. 3. При вычислении тока, проходящего через  $p-n$ -переход, необходимо знать распределение потенциала. В результате эксперимента [1,2] известно, что в то время как на нижней части образца внешнее СВЧ поле не равно нулю, в верхней его части СВЧ поле отсутствует (рис. 4). В результате нижняя часть образца выступает как источник эдс. Поэтому при вычислении ВАХ образца в качестве эквивалентной схемы можно взять параллельно соединенные горячие и холодные диоды. На рис. 4 представлена эквивалентная схема  $p-n$ -перехода в СВЧ поле. Здесь можно представить, что элементы диода — это участки разветвленной цепи. С учетом поверхности и формы образца вихревые токи могут быть разными. В работе [3] получено выражение ВАХ для случая, когда некоторая часть  $p-n$ -перехода находится внутри волновода, а в верхней (холодной) части образца расположены токовые контакты (это соответствует условиям эксперимента [1,2]):

$$I = I_{cs} \frac{l_1}{l} \left\{ \exp\left[\frac{e(U_0 - \bar{U}_c)}{kT}\right] - 1 \right\} + I_{hs} \frac{l - l_1}{l} \left\{ \exp\left[\frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - U_0 + \bar{U}_h - \bar{U}_\sim)}{kT_e}\right] - 1 \right\}. \quad (5)$$

Здесь  $U_0$  — постоянное смещение, приложенное к барьеру,  $\bar{U}_c$  и  $\bar{U}_h$  связаны с падением напряжения в холодной и горячей частях диода,  $\bar{U}_\sim$  — модуляция высоты потенциального барьера  $p-n$ -перехода под действием СВЧ поля,



**Рис. 4.** Эквивалентная схема  $p$ - $n$ -перехода, часть которого находится в СВЧ поле. Части образца, находящиеся:  $a$  — вне СВЧ поля,  $b$  — в СВЧ поле;  $r_d$  — сопротивления  $p$ - $n$ -перехода;  $\varepsilon_n, \varepsilon_p$  — эдс, генерируемые диодом в СВЧ поле;  $C$  — емкость  $p$ - $n$ -перехода;  $R_b$  — эффективное сопротивление базы.

$I_{cs}$  и  $I_{hs}$  — токи насыщения соответственно в холодной и горячей частях диода.

Как видно из формулы (5), она состоит из двух частей.

1) Ток в горячей части

$$I = I_{hs} \frac{l - l_1}{l} \left\{ \exp \left[ \frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - U_0 + \bar{U}_h - \bar{U}_{\sim})}{kT_e} \right] - 1 \right\}. \quad (6)$$

2) Дополнительный ток в холодной части

$$I_c = I_{cs} \frac{l_1}{l} \left\{ \exp \left[ \frac{e(U_0 - \bar{U}_c)}{kT} \right] - 1 \right\}. \quad (7)$$

Рассмотрим ток короткого замыкания:

$$I_{sc} = \frac{l_1}{l} I_{cs} \left[ \exp \left( \frac{-e\bar{U}_c}{kT} \right) - 1 \right] + \frac{l - l_1}{l} I_{hs} \left\{ \exp \left[ \frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - \bar{U}_h - \bar{U}_{\sim})}{kT_e} \right] - 1 \right\}. \quad (8)$$

Если на учитывать падение напряжения на базе (удельное сопротивление  $\rho = 0$ )  $U_c = 0$ ,  $U_h = 0$ , то зна-

чение тока короткого замыкания имеет простой вид

$$I_{sc} = \frac{l - l_1}{l} I_{hs} \left\{ \exp \left[ \frac{e\varphi_0}{kT} - \frac{e(\varphi_0 - \bar{U}_{\sim})}{kT_e} \right] - 1 \right\}, \quad (9)$$

где  $\varphi_0 - \bar{U}_{\sim}$  — высота потенциального барьера в режиме тока короткого замыкания. Отсюда следует, что эффективная высота потенциального барьера значительно меньше, чем высота равновесного барьера в режиме короткого замыкания. В работе [1] было обнаружено, что в режиме короткого замыкания эффективная высота барьера  $\varphi$  меньше равновесного значения  $\varphi_0$ . Это свидетельствует о возможности возникновения большого аномального тока короткого замыкания при отсутствии разогрева. Такие аномально большие токи короткого замыкания также наблюдались в работе [1].

Рассмотрим режим холостого хода. Приравняв выражение (5) к нулю, получим следующее уравнение для напряжения холостого хода:

$$1 = \frac{l_1}{l} \exp \left( \frac{U_0 - \bar{U}_c}{kT} \right) + \left( 1 - \frac{l_1}{l} \right) \exp \left[ \frac{e\varphi_0}{kT_e} \left( 1 - \frac{T}{T_e} \right) + \frac{e(U_0 - \bar{U}_h + \bar{U}_{\sim})}{kT_e} \right]. \quad (10)$$

При больших мощностях диод будет находиться под действием напряжения обратного направления. Тогда из формулы (10) получим следующее соотношение для напряжения холостого хода:

$$U_{oc} = - \left( \frac{T_e}{T} - 1 \right) \varphi_0 + \bar{U}_h - \bar{U}_{\sim} + \frac{kT_e}{T} \ln \left( \frac{l}{l - l_1} \right) + \varepsilon_p + \varepsilon_n, \quad (11)$$

где слагаемые  $\bar{U}_h$  и  $\frac{kT_e}{T} \ln \left( \frac{l}{l - l_1} \right)$  являются членами, возникающими за счет вихревых токов;  $\varepsilon_n = \alpha_e(T_e - T)$  и  $\varepsilon_p = \alpha_p(T_p - T)$  — эдс горячих электронов и дырок в  $n$ - и  $p$ -областях,  $\alpha_e$  и  $\alpha_p$  — коэффициенты термоэдс горячих электронов и дырок [8]. Они являются положительными и приведут к уменьшению напряжения холостого хода, генерируемого в диоде. Первый член формулы (11)  $\left( \frac{T_e}{T} - 1 \right) \varphi_0$  — это термоэдс, возникающая на потенциальном барьере за счет разогрева электронов. Напряжение холостого хода при этом также возрастает за счет модуляции потенциального барьера, что определяется третьим членом выражения  $U_{oc}$ .

### 3. Заключение

В  $p$ - $n$ -переходе, помещенном в СВЧ поле, возникают вихревые токи. Разогрев электронов и модуляции потенциального барьера увеличивают напряжение, генерируемое на  $p$ - $n$ -переходе, а вихревые токи уменьшают как эдс, так и токи, генерируемые диодом в сильном СВЧ поле.

## Список литературы

- [1] Н.А. Абляимова, А.И. Вейнгер, В.С. Питанов. ФТП, **22**, 2001 (1988).
- [2] Н.А. Абляимова, А.И. Вейнгер, В.С. Питанов. ФТП, **26**, 1041 (1992).
- [3] Г. Гулямов, Б. Хамидова. ФТП, **30**, 769 (1996).
- [4] А.Г. Самойлович. В сб.: *Проблемы современной физики* (М., Наука, 1980).
- [5] Г. Гулямов, М.Г. Дадамирзаев, С.Р. Бойдедаев. ФТП, **34**, 572 (2000).
- [6] Г. Гулямов, М.Г. Дадамирзаев, С.Р. Бойдедаев. ФТП, **34**, 266 (2000).
- [7] С.Х. Шамирзаев, Г. Гулямов, М.Г. Дадамирзаев, А.Г. Гулямов. ФТП, **43**, 53 (2009).
- [8] С.П. Ашмонтас. *Электроградиентные явления в полупроводниках* (Вильнюс, Мокслас, 1984).

Редактор Т.А. Полянская

## Circulation currents in $p-n$ -junction in microwave field

S.H. Shamirzaev<sup>+</sup>, G. Gulyamov\*,  
M.G. Dadamirzaev<sup>\*,+</sup>, A.G. Gulyamov\*

\* Namangan Engineering-Pedagogical Institute,  
716003 Namangan, Uzbekistan

+ Physicotechnical Institute of Republic Uzbekistan,  
700084 Tashkent, Uzbekistan

**Abstract** It has been explored the origin circulation currents on  $p-n$ -junction in strong microwave field. It is shown that circulation currents reduces electromotive force (emf) hot carriers (medias) in diode. It has been removal formula, taking into account the sizes sample at calculation current on  $p-n$ -junction in the strong microwave field.