

## ЭДС, возникающая в $p-n$ -переходе при воздействии сильного СВЧ поля и света

© Г. Гулямов<sup>1</sup>, У.И. Эркабоев<sup>2</sup>, Н.Ю. Шарипбаев<sup>2</sup>, А.Г. Гулямов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Наманганский инженерно-строительный институт,  
160103 Наманган, Узбекистан

<sup>2</sup> Наманганский инженерно-технологический институт,  
160115 Наманган, Узбекистан

<sup>3</sup> Физико-технический институт Академии наук Республики Узбекистан,  
100084 Ташкент, Узбекистан

E-mail: gulyamov1949@mail.ru

(Получена 15 мая 2018 г. Принята к печати 1 октября 2018 г.)

Рассмотрено влияние сильного электромагнитного поля на токи и электродвижущие силы в  $p-n$ -переходе. Показано, что при воздействии электромагнитной волны  $p-n$ -переход становится источником электродвижущей силы зависящей от тока. Получено аналитическое выражение для электродвижущей силы и внутреннего сопротивления такого источника. Из экспериментальных графиков вольт-амперной характеристики  $p-n$ -перехода, помещенного в сильное сверхвысокочастотное электромагнитное поле, получены графики зависимости электродвижущей силы и внутреннего сопротивления от токов через диод.

DOI: 10.21883/0000000000

### 1. Введение

При воздействии электромагнитного поля на  $p-n$ -переход диод становится источником электродвижущей силы эдс [1]. Вывод  $p-n$ -перехода из термодинамического равновесия приводит к возникновению релаксационных процессов. Изменяя мощность СВЧ поля при воздействии света и деформации, можно менять характеристики диода [2]. В работах [3–10] показано как одновременное воздействие света, СВЧ поля и деформации влияет на ее чувствительность. Например, в работе [3] показано, что освещение  $p-n$ -перехода вблизи критической точки сильно увеличивает ее тензочувствительность. Это обусловлено тем, что вблизи фундаментального поглощения деформация сильно влияет на коэффициент поглощения света, это приводит к аномально большим значениям тензочувствительности. Влияние внешних воздействий на эдс, возникающую в диоде, позволяет управлять характеристиками этих приборов и расширять их функциональные возможности. Однако в известных работах не исследована эдс  $p-n$ -перехода, зависящего от тока, напряжения, освещения, помещенного в сильное СВЧ поле.

Цель настоящей работы заключается в исследовании эдс, возникающей в  $p-n$ -переходе при воздействии СВЧ поля и света.

### 2. Связь вольт-амперной характеристики $p-n$ -перехода с возникающей эдс и внутренним сопротивлением диода

Рассмотрим ВАХ диода, помещенного в сильное электромагнитное поле. При воздействии СВЧ поля, света,

деформации и других внешних факторов ВАХ диода изменяется. Диод становится источником эдс [1]. При этом эдс  $p-n$ -перехода в неравновесном состоянии зависит от тока через диод. Для определения эдс разложим ток через диод в ряд по напряжению и вблизи напряжения и ограничимся линейным членом по  $(U - U_0)$ :

$$j(U) = j(U_0) + \left. \frac{\partial j}{\partial U} \right|_{U=U_0} (U - U_0). \quad (1)$$

Это уравнение прямой в  $jU$ -плоскости. Оно является касательной к кривой ВАХ диода в точке  $(U_0, j(U_0))$  (рис. 1, а).

Прямая  $I$  соответствует ВАХ участка цепи, содержащей постоянный источник тока с эдс  $\varepsilon$  и с постоянным внутренним сопротивлением  $r_i$  (рис. 1, б).

ВАХ источника тока с постоянной эдс и постоянным сопротивлением имеет следующий вид:

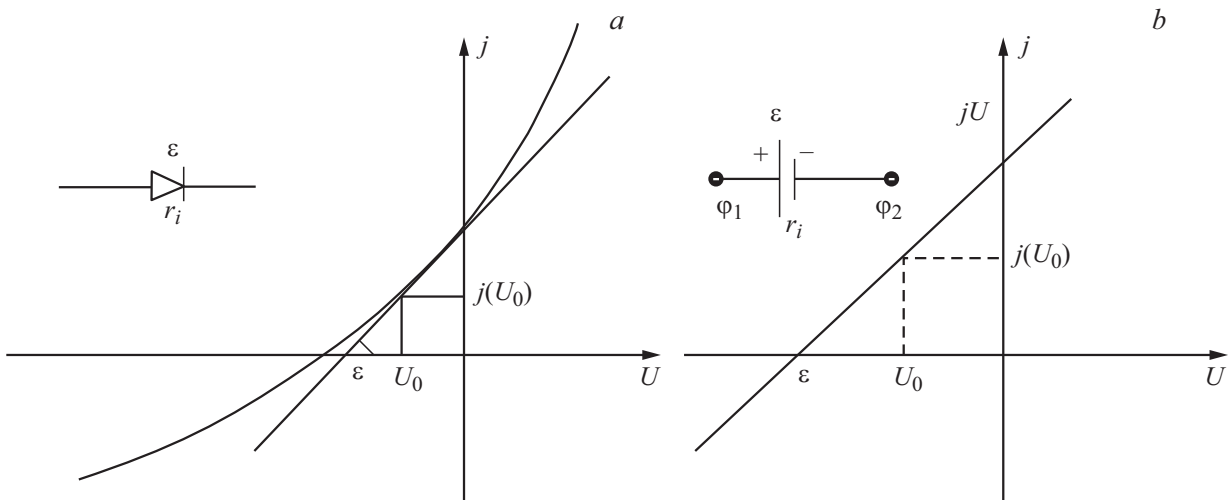
$$j = \frac{\varepsilon + U}{r_i} = j_{sc} + \frac{U}{r_i}. \quad (2)$$

Здесь  $\varepsilon$  — эдс источника,  $r_i$  — его внутреннее сопротивление,  $j_{sc} = \frac{\varepsilon}{r_i}$  — ток короткого замыкания. Сравнивая (1) и (2), находим, что ток короткого замыкания диода при напряжении  $U_0$  равен

$$j_{sc}(U_0) = j_0(U_0) - \left. \frac{\partial j}{\partial U} \right|_{U_0} U_0. \quad (3)$$

Внутреннее сопротивление источника

$$r_i(U_0) = \left( \left. \frac{\partial j}{\partial U} \right|_{U=U_0} \right)^{-1} \quad (4)$$



**Рис. 1.** ВАХ  $p-n$ -перехода с источником эдс  $\varepsilon(j)$  и с внутренним сопротивлением  $r(j)$ , зависящими от тока через диод (а). ВАХ источника тока с постоянной эдс  $\varepsilon$  и с постоянным сопротивлением  $r$ , не зависящим от тока (б).

и эдс, генерируемая диодом,

$$\varepsilon = j_{sc} r_i = \left( j(U_0) - \left. \frac{\partial j}{\partial U} \right|_{U=U_0} U_0 \right) \left( \left. \frac{\partial j}{\partial U} \right|_{U=U_0} \right)^{-1},$$

$$\varepsilon = j(U_0) \left( \left. \frac{\partial j}{\partial U} \right|_{U=U_0} \right)^{-1} - U_0. \quad (5)$$

Все величины (3)–(5) зависят от напряжения  $U_0$ , приложенного к диоду. Если  $U_0 = \text{const}$ , то диод работает в режиме постоянного напряжения и его можно заменить источником тока и постоянной эдс (5) с внутренним сопротивлением (4) и с током короткого замыкания (3).

Если известна ВАХ диода, то каждому значению  $U_0$  соответствует ток  $I(U_0)$ . Тогда (используя выражения (3), (4) и (5)) эдс, внутреннее сопротивление и токи короткого замыкания можно выразить через ток. Таким образом, получаем эдс и внутреннее сопротивление диода, зависящие от тока  $I(U_0)$ . Отсюда следует вывод, что, изменяя ток через диод, можно управлять эдс, генерируемой  $p-n$ -переходом в СВЧ поле.

Как известно, теоретически ВАХ  $p-n$ -перехода можно получить через аналитическое выражение для эдс, тока короткого замыкания и внутреннего сопротивления диода как источника тока. Рассмотрим ВАХ освещенного  $p-n$ -перехода с горячими носителями в сильном СВЧ поле [2–4]:

$$j = j_s \left( \exp \left( \frac{e\varphi_0}{mkT} - \frac{e(\varphi_0 - U_0 + U_1)}{mkT_e} \right) - 1 \right) - j_\phi(I_0). \quad (6)$$

Здесь  $j_s$  — ток насыщения  $j_s = e \left( \frac{D_n}{L_n N_a} + \frac{D_p}{L_p N_d} \right) n_i^2$ ,  $n_i^2 = N_c N_v \exp \left( -\frac{E_g}{kT} \right)$ ,  $T$  и  $T_e$  — температуры решетки и электронов,  $\varphi_0$  — равновесная высота потенциального

барьера,  $U_0$  — напряжение, приложенное на  $p-n$ -переход,  $U_1$  — усредненное напряжение, связанное с амплитудой СВЧ поля,  $m$  — коэффициент неидеальности,  $j_\phi$  — фототок,  $I_0$  — интенсивность света.

Используя выражения (3), (4), (5) и (6), получим следующие выражения для внутреннего сопротивления  $p-n$ -перехода:

$$r_i(U_0) = \frac{mkT_e}{e j_s} \exp \left( \frac{e\varphi_0}{mkT} - \frac{e(\varphi_0 - U_0 + U_1)}{mkT_e} \right). \quad (7)$$

Отсюда следует, что внутреннее сопротивление диода с горячими носителями заряда зависит от температуры носителей и внешнего напряжения. При отсутствии разогрева  $T_e = T$  внутреннее сопротивление определяется напряжением и выпрямлением СВЧ поля. В режиме короткого замыкания  $U = 0$ :

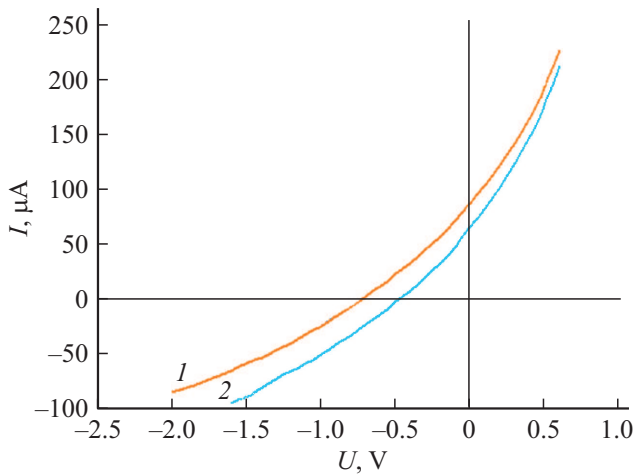
$$r_i(U_0) = \frac{mkT}{e j_s} \exp \left( -\frac{eU_1}{mkT} \right). \quad (8)$$

Отсюда следует, что модуляция барьера СВЧ полем с амплитудой  $U_1$  уменьшает внутреннее сопротивление диода.

Генерируемая диодом в СВЧ поле эдс при напряжении  $U = U_0$  равняется

$$\varepsilon = \frac{mkT_e}{e} \left( 1 - \left( 1 + \frac{j_\phi}{j_s} \right) \times \exp \left( \frac{e\varphi_0}{mkT} - \frac{e(\varphi_0 + U_1)}{mkT_e} \right) \right) - U_0. \quad (9)$$

Отсюда видно, что эдс, генерируемая диодом в СВЧ поле, зависит от приложенного напряжения  $U_0$ , температуры электронов  $T_e$ , величины модуляции высоты



**Рис. 2.** ВАХ  $p-n$ -перехода: 1 — при СВЧ воздействии; 2 — при освещении и СВЧ воздействии [1].

барьера  $U_1$ . В отсутствие фототока и при условии  $\frac{e\phi_0}{mkT} - \frac{e(\phi_0 - U_0 + U_1)}{mkT_e} \ll 1$  эдс равняется

$$\varepsilon = \phi_0 \left( \frac{T_e}{T} - 1 \right) + U_1. \quad (10)$$

Это известное выражение для термоэдс горячих электронов в потенциальном барьере [2–4].

В режиме холостого хода  $j = 0$  и эдс источника равняется:

$$\varepsilon = \phi_0 \left( \frac{T_e}{T} - 1 \right) + U_1 - \frac{kT_e}{me} \ln \left( 1 + \frac{j_\phi}{j_s} \right). \quad (11)$$

Отсюда видно, что освещение уменьшает эдс  $p-n$ -перехода, генерируемую в сильном СВЧ поле. Эти результаты — экспериментальные результаты работы [1]. Из рис. 2 видно, что напряжение холостого хода уменьшается при освещении диода и кривая ВАХ сдвигается в сторону меньших напряжений.

### 3. Определение эдс в $p-n$ -переходе при воздействии сильной СВЧ волны

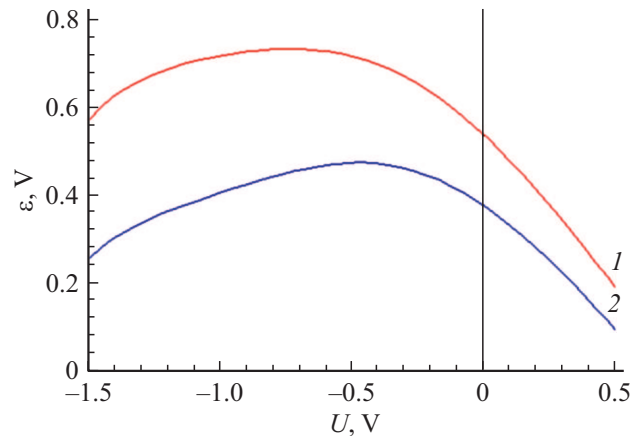
В работах [1,3] получены ВАХ  $p-n$ -перехода в сильном СВЧ поле при воздействии освещения (рис. 2). Внешнее электромагнитное поле сильно меняет токи и эдс, генерируемые  $p-n$ -переходом за счет увеличения рекомбинационных токов в диоде.

В работе [1] разработана методика определения ВАХ  $p-n$ -перехода в СВЧ поле в импульсном режиме. Используя ВАХ  $p-n$ -перехода в СВЧ поле [1] с помощью формул (3), (4) и (5) определим эдс, зависящие от поля.

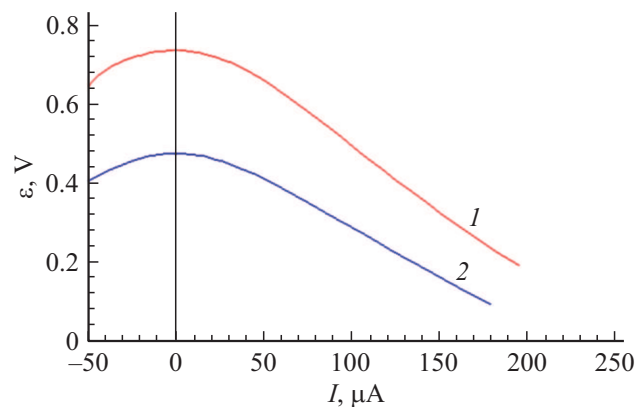
На рис. 3 приведена эдс горячих электронов, полученная из экспериментальной кривой 1 на рис. 2 [1]. Как видно из графика, эдс сильно зависит от внешнего

смещения  $U_0$ . При изменении внешнего смещения в прямом направлении от 0 до 0.5 В, эдс уменьшается от 0.55 до 0.2 В. При подаче обратного смещения эдс растет. При изменении  $U_0$  от 0 до -1 В эдс растет от 0.58 до 0.75 В, затем опять уменьшается. Таким образом, с помощью внешнего смещения  $U_0$  можно управлять эдс, генерируемой СВЧ полем. Отсюда следует, что диод в СВЧ поле становится источником эдс, зависящей от внешнего смещения  $U_0$ .

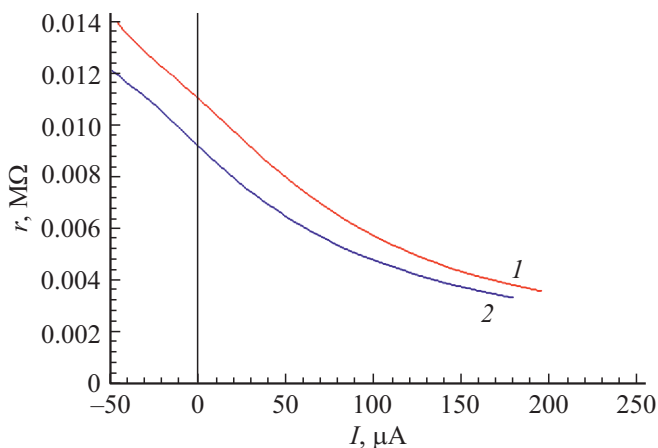
На рис. 4 приведена та же самая эдс  $p-n$ -перехода в зависимости от тока через диод. Из рисунка видно, что при увеличении тока от 0 до 200 мкА эдс горячих носителей изменяется от 0.73 до 0.2 В, т.е. с ростом прямого тока эдс, генерируемая диодом, сильно уменьшается. Такое поведение эдс объясняется тем, что с ростом прямого напряжения высота потенциального барьера  $\phi$  уменьшается. Генерируемая горячими электронами эдс прямо пропорциональна высоте потенциального барьера  $\phi$ , а при подаче обратного смещения высота барьера увеличивается, это приводит к тому, что эдс, генери-



**Рис. 3.** Зависимость эдс  $p-n$ -перехода в СВЧ поле от внешнего напряжения  $U$ : 1 — при СВЧ воздействии, 2 — при освещении и СВЧ воздействии.



**Рис. 4.** Зависимость эдс  $p-n$ -перехода от тока: 1 — только при СВЧ воздействии, 2 — при одновременном освещении и СВЧ воздействии.



**Рис. 5.** Зависимость внутреннего сопротивления  $p-n$ -переходов от тока: 1 — только СВЧ воздействие, 2 — при освещении и СВЧ воздействии.

руемая диодом, растет с ростом обратного смещения. Этот же механизм объясняет зависимость эдс от тока через диод. С увеличением прямого тока высота потенциального барьера уменьшается. Это происходит до тех пор, пока начальный барьер не исчезнет. Это приводит к тому, что с ростом тока эдс также уменьшается.

При одновременном воздействии СВЧ поля и освещения ВАХ  $p-n$ -перехода сдвигается вниз по оси тока и направо по оси напряжений. Используя разработанную методику с помощью графического дифференцирования, из кривой 2 рис. 2 определим зависимость эдс от приложенного напряжения  $U_0$ . На рис. 3 приведена эдс, полученная из экспериментальной ВАХ. Как видно из графика, при изменении внешнего напряжения в  $p-n$ -переходе в интервале от  $-1.5$  до  $-0.5$  В эдс, генерируемая диодом, увеличивается от 0.27 до 0.48 В. В этом случае освещение уменьшает эдс, генерируемую диодом. Это обусловлено тем, что при освещении диода увеличиваются генерационные токи и фотоэдс, возникающие в  $p-n$ -переходе, которые направлены противоположно к эдс горячих носителей. В этом случае результирующая эдс определяется разностью эдс горячих носителей и фотоэдс  $p-n$ -перехода. Это приводит к уменьшению результирующей эдс, что и наблюдается в работе [1].

Результирующая эдс обусловлена суммой эдс рекомбинационных и генерационных процессов, так как эти процессы противоположны, то эдс, вызванные этими процессами, имеют противоположные знаки. Разогрев и модуляция высоты барьера  $p-n$ -перехода увеличивает рекомбинационные токи. СВЧ волна увеличивает прямой ток диода. Генерационные токи противоположны рекомбинационным токам и дают токи в обратном направлении. Результирующий ток через  $p-n$ -переход определяется разностью рекомбинационных и генерационных токов. Поэтому освещение уменьшает токи и эдс, генерируемые  $p-n$ -переходом в СВЧ поле.

На рис. 5 приведены зависимости сопротивления  $p-n$ -переходов от напряжения и токов через диод. Как видно из этих рисунков, внутреннее сопротивление  $p-n$ -перехода в СВЧ поле сильно зависит от тока. При изменении тока через диод в пределах от  $-50$  до  $150$  мкА внутреннее сопротивление уменьшается от 14 до 5 кОм. Освещение уменьшает внутреннее сопротивление диода, при тех же интервалах изменения тока  $r_i$  меняется от 12 до 4 кОм. Это обусловлено тем, что освещение увеличивает генерационные токи и в то же время рекомбинационные токи почти не меняются.

#### 4. Заключение

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:  $p-n$ -переход, помещенный в сильное электромагнитное поле, становится источником тока, зависящим от внешнего напряжения. При известной ВАХ диода, проведя касательную к ВАХ, можно определить эдс и внутреннее сопротивление диода. Используя формулы (3), (4) и (5), можно вычислить эдс, токи короткого замыкания и внутренние сопротивления источника тока, зависящего от напряжения. С помощью предложенной методики можно определить воздействие света и СВЧ поля на токи и эдс, генерируемые на  $p-n$ -переходе.

#### Список литературы

- [1] Н.А. Аблязимова, А.И. Вейнгер, В.С. Питанов. ФТП, **26** (6), 1041 (1992).
- [2] Г. Гулямов, А.Г. Гулямов. ФТП, **49** (6), 839 (2015).
- [3] К.М. Алиев, И.К. Камиллов, Х.О. Ибрагимов, Н.С. Абакарова. ФТП, **49**(3), 413 (2015).
- [4] Г. Гулямов. ФТП, **30** (7), 1279 (1996).
- [5] А.И. Вейнгер, Т.В. Тиснек, И.В. Кочман, В.И. Окулов. ФТП, **51** (2), 172 (2017).
- [6] К.М. Алиев, И.К. Камиллов, Х.О. Ибрагимов, Н.С. Абакарова. ФТП, **46** (8), 1082 (2012).
- [7] К.М. Алиев, И.К. Камиллов, Х.О. Ибрагимов, Н.С. Абакарова. ФТП, **43**, 517 (2009).
- [8] К.М. Алиев, И.К. Камиллов, Х.О. Ибрагимов, Н.С. Абакарова. ЖТФ, **81**, 141 (2011).
- [9] К.М. Алиев, И.К. Камиллов, Х.О. Ибрагимов, Н.С. Абакарова. Письма ЖТФ, **37**, 42 (2011).
- [10] K.M. Aliev, I.K. Kamilov, Kh.O. Ibragimov, N.S. Abakarova. Sol. St. Commun., **148**, 171 (2008).

Редактор Г.А. Оганесян

## EMF appearing in the $p-n$ -junction which influenced strong microwave fields and light

G. Gulyamov<sup>1</sup>, U.I. Erkaboev<sup>2</sup>, N.Yu. Sgaribaev<sup>2</sup>,  
A.G. Gulyamov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Namangan Engineering-Construction Institute,  
106103 Namangan, Uzbekistan

<sup>2</sup> Namangan Engineering-Technological Institute,  
160115 Namangan, Uzbekistan

<sup>3</sup> Physicotechnical Institute,  
Academy of Sciences of the Republic Uzbekistan,  
100084 Tashkent, Uzbekistan

**Abstract** The effect of a strong electromagnetic field on currents and electromotive forces in a  $p-n$ -junction is considered. It is shown that when exposed to an electromagnetic wave, the  $p-n$ -junction becomes a source of electromotive force (EMF) dependent on current. An analytical expression for the EMF and internal resistance of such a source is obtained. From the experimental graphs of the current-voltage characteristics of the  $p-n$ -junction placed in a strong microwave (UHF) electromagnetic field, graphs of EMF and internal resistance versus currents through the diode were obtained.