

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

© Г. Гулямов¹, У.И. Эркабоев², Н.Ю. Шарипбаев², А.Г. Гулямов³

¹ Наманганский инженерно-строительный институт,
160103 Наманган, Узбекистан

² Наманганский инженерно-технологический институт,
160115 Наманган, Узбекистан

³ 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/FTP.2019.03.47293.8913

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 ε 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 ε — 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

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

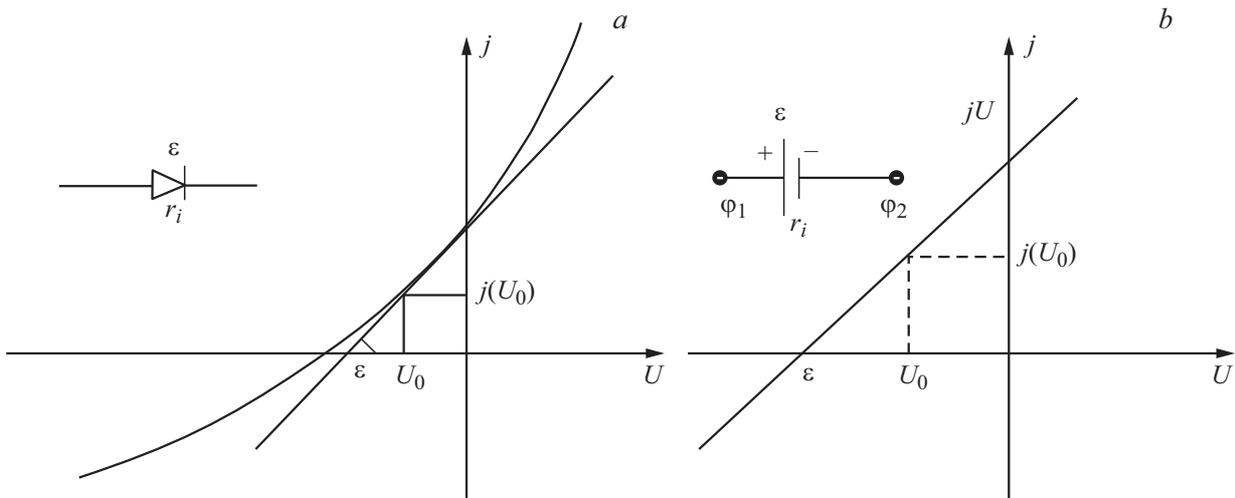


Рис. 1. ВАХ p-n-перехода с источником эдс $\varepsilon(j)$ и с внутренним сопротивлением $r(j)$, зависящими от тока через диод (а). ВАХ источника тока с постоянной эдс ε и с постоянным сопротивлением r , не зависящим от тока (б).

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, φ_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_ϕ — 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

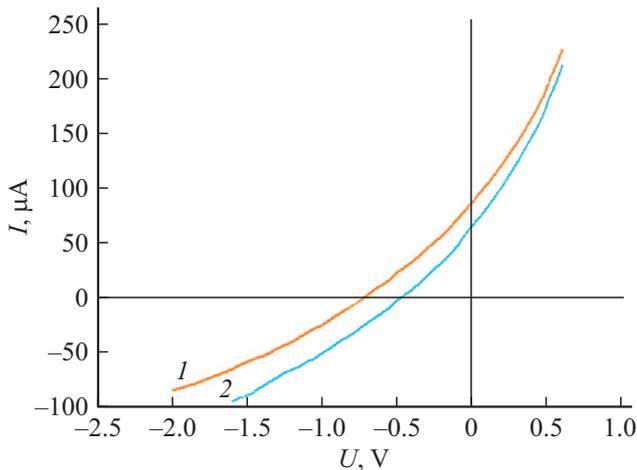


Рис. 2. ВАХ $p-n$ -перехода: 1 — при СВЧ воздействии; 2 — при освещении и СВЧ воздействии [1].

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 ϕ уменьшается. Генерируемая горячими электронами эдс прямо пропорциональна высоте потенциального барьера ϕ , а при подаче обратного смещения высота барьера увеличивается, это приводит к тому, что эдс, генери-

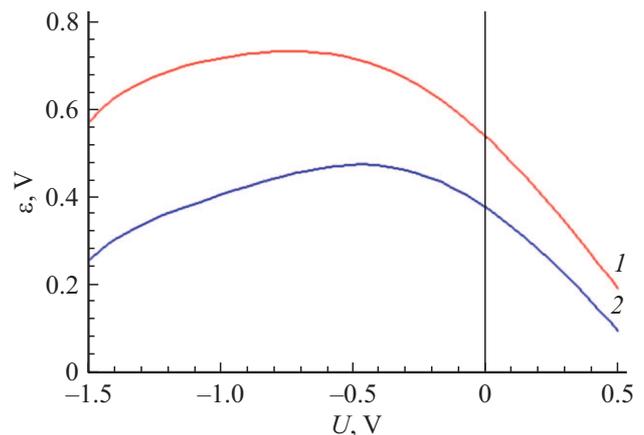


Рис. 3. Зависимость эдс $p-n$ -перехода в СВЧ поле от внешнего напряжения U : 1 — при СВЧ воздействии, 2 — при освещении и СВЧ воздействии.

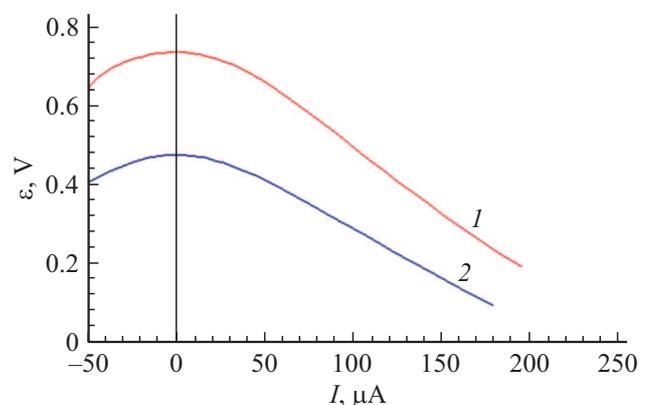


Рис. 4. Зависимость эдс $p-n$ -перехода от тока: 1 — только при СВЧ воздействии, 2 — при одновременном освещении и СВЧ воздействии.

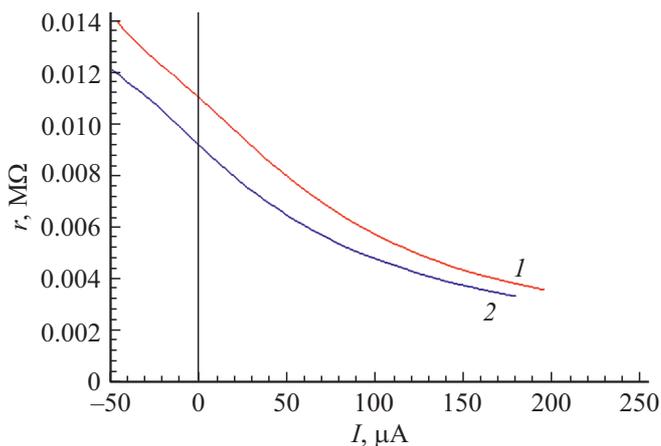


Рис. 5. Зависимость внутреннего сопротивления $p-n$ -переходов от тока: 1 — только СВЧ воздействие, 2 — при освещении и СВЧ воздействии.

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. Gulyamov¹, U.I. Erkaboev², N.Yu. Sgaribaev²,
A.G. Gulyamov³

¹ Namangan Engineering-Construction Institute,
106103 Namangan, Uzbekistan

² Namangan Engineering-Technological Institute,
160115 Namangan, Uzbekistan

³ 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.