

ВЛИЯНИЕ СИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТОКИ И ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИЕ СИЛЫ В $p-n$ -ПЕРЕХОДЕ

Гулямов Гафур, д-р физ.-мат. наук, профессор Наманганского инженерно-технологического института и Наманганского инженерно-строительного института. Наманган, Узбекистан

Эркабоев Улугбек Инаятиллаевич, д-р философии физ.-мат. наук, доцент Наманганского инженерно-технологического института. Наманган, Узбекистан. E-mail: erkaboev1983@mail.ru

Гулямов Абдурасул Гафурович, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Физико-технического института АН РУз. Ташкент, Узбекистан

Аннотация. 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 (ЭДС) зависящей от тока. Получено аналитическое выражение для ЭДС и внутреннего сопротивления такого источника. Из экспериментальных данных вольтамперной характеристики $p-n$ -перехода, помещенного в сильное сверхвысокочастотное (СВЧ) электромагнитное поле, получены зависимости ЭДС и внутреннего сопротивления от токов через диод.

Ключевые слова: СВЧ-поле, $p-n$ -переход, ЭДС, внутреннее сопротивление.

INFLUENCE OF A STRONG ELECTROMAGNETIC FIELD ON CURRENTS AND ELECTROMOTIVE FORCE IN THE $p-n$ -JUNCTIONS

Gulyamov Gafur, doctor of sciences in physical and mathematical sciences, professor of Namangan Engineering-Technological Institute and Namangan Engineering-Construction Institute. Namangan, Uzbekistan

Erkaboev Ulugbek I., doctor of Philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences, associate professor of Namangan Engineering-Technological Institute. Namangan, Uzbekistan

Gulyamov Abdurasul G., doctor of sciences in physical and mathematical sciences, senior researcher of Physical-Technical Institute, NGO «Physics-Sun», Academy of Sciences of Uzbekistan. Tashkent, Uzbekistan

Abstract. The influence of a strong electromagnetic field on the currents and electromotive forces in the $p-n$ -junction is considered. It is shown that under the influence of an electromagnetic wave the $p-n$ -junction becomes a source of electromotive force (EMF) dependent on the current. Obtained, analytical expression for EMF and internal resistance of such source. From the experimental graphs of the current-voltage characteristic of the $p-n$ -junction placed in a strong microwave (microwave) electromagnetic field, plots of the dependence of the EMF and internal resistance on currents through a diode are obtained.

Key words: Microwave fields, $p-n$ -junction, EMF, internal resistance.

1. Введение

При воздействии электромагнитного поля на $p-n$ -переход диод становится источником ЭДС [1]. Вывод $p-n$ -перехода из термодинамического равновесия приводит к возникновению релаксационных процессов. Изменяя мощность СВЧ поля, подавая свет и деформацию можно менять характеристики диода [2]. В работах [3-10] показано как одновременно 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 расширить их функциональные возможности. Однако в известных работах не исследована ЭДС $p-n$ -перехода

зависящего от тока, напряжении, освещения помещенного в сильное СВЧ-поле.

Целью настоящей работы является исследование ЭДС, возникающего в $p-n$ -переходах при воздействии СВЧ-поля и света.

2. Связь ВАХ $p-n$ -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 вблизи напряжения U_0 и ограничимся линейным членом по $(U - U_0)$:

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

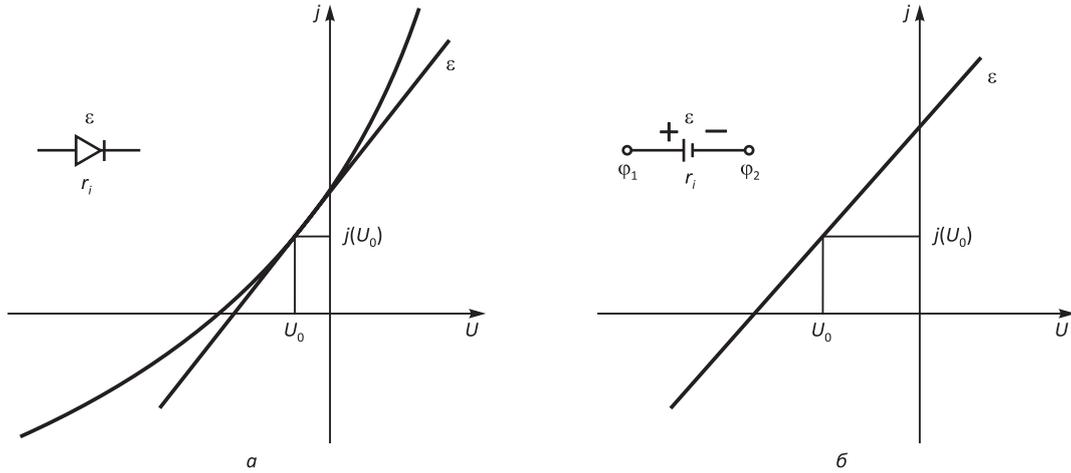


Рис. 1. ВАХ $p-n$ -перехода с источником ЭДС $\varepsilon(j)$ с внутренним сопротивлением $r(j)$, зависящих от тока через диод (а). ВАХ источника тока с постоянной ЭДС ε и с постоянным сопротивлением r , не зависящий от тока (б).

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

Кривая (1) соответствует ВАХ участка цепи содержащий постоянный источник тока с ЭДС ε и с постоянным внутренним сопротивлением r_i (рис. 1б).

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

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

Здесь ε – ЭДС источника; r_i – его внутреннее сопротивление; $j_{кз} = \varepsilon/r_i$ – ток короткого замыкания. Сравнивая (1) и (2) находим, что ток короткого замыкания диода при напряжения U_0 равен:

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

Внутреннее сопротивление источника

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

и ЭДС, генерируемая диодом

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

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

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

Если известна ВАХ диода, каждому значению U_0 соответствует ток $I(U_0)$. Тогда, используя выражения (3), (4) и (5), ЭДС, внутреннее сопротивление и ток 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 из ВАХ $p-n$ -перехода можно получить 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 выражение (3)–(6) получим следующие выражения для внутреннего сопротивления $p-n$ -перехода:

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

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

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

Следовательно модуляция барьера СВЧ-полем с амплитудой U_1 уменьшает внутреннее сопротивления диода.

ЭДС, генерируемая диодом в СВЧ-поле при напряжении $U = U_0$, равняется

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

Отсюда видно, что ЭДС, генерируемая диодом в СВЧ-поле зависит от приложенного напряжения U_0 , температуры электронов T_e , величины модуляции высоты барьера U_1 . В отсутствие фототока и при условии

$$\frac{e\varphi_0}{mkT} - \frac{e(\varphi_0 - U_0 + U_1)}{mkT_e} \ll 1$$

ЭДС равняется

$$\varepsilon = \varphi_0 \left(\frac{T_e}{T} - 1 \right) + U_1. \quad (10)$$

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

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

$$\varepsilon = \varphi_0 \left(\frac{T_e}{T} - 1 \right) + U_1 - \frac{kT_e}{me} \ln \left(1 + \frac{j_\phi}{j_s} \right). \quad (11)$$

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

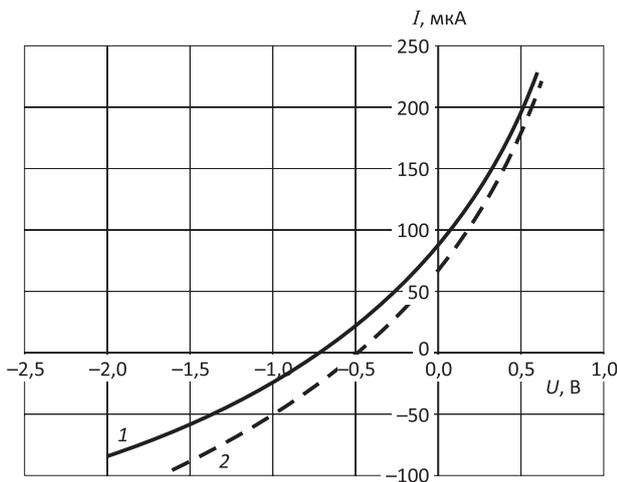


Рис. 2. ВАХ p - n -перехода:

1 – при СВЧ-воздействии; 2 – при освещении и СВЧ-воздействии [1]

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 (см. 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)–(5) определим ЭДС, зависящую 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 .

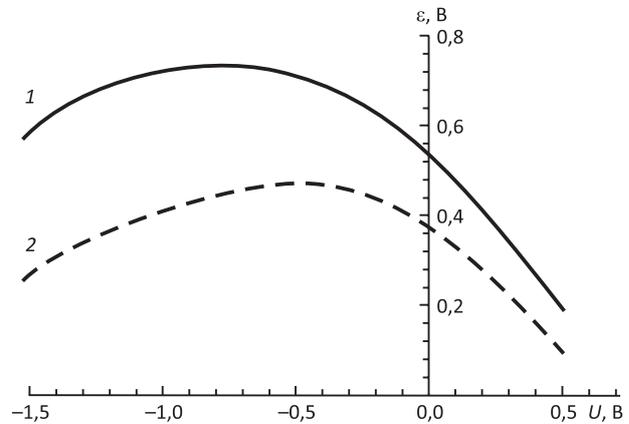


Рис. 3. Зависимость ЭДС p - n -перехода в СВЧ-поле от внешнего напряжения U :

1 – при СВЧ-воздействии; 2 – при освещении и СВЧ-воздействии

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, то есть с ростом прямого тока ЭДС, генерируемая диодом, сильно уменьшается. Такое поведение ЭДС объясняется тем, что с ростом прямого напряжения высота потенциального барьера φ уменьшается. ЭДС, генерируемая горячими электронами прямо пропорционально высоте потенциального барьера φ , а при подаче обратного смещения высота барьера увеличивается, это приводит к тому, что ЭДС, генерируемая 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 так же уменьшается.

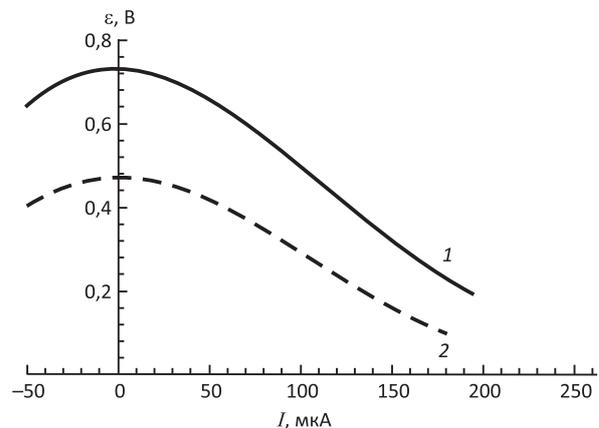


Рис. 4. Зависимость ЭДС p - n -перехода от тока:

1 – только при СВЧ-воздействии; 2 – при одновременном освещении и СВЧ-воздействии

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 (см. 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 при в СВЧ-поле.

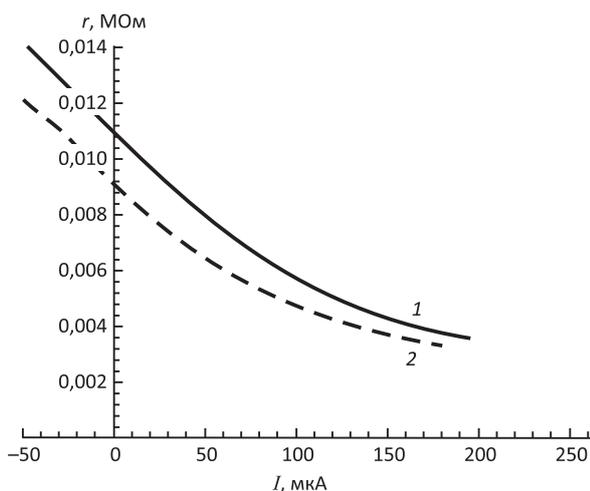


Рис. 5. Зависимость внутреннего сопротивления $p-n$ -переходов от тока:

1 – только СВЧ-воздействие; 2 – при освещении и СВЧ-воздействии

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 тоже 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 зависящей от внешнего напряжения. При известной ВАХ диода проведя касательную к ВАХ можно определить ЭДС, внутреннее сопротивление диода. Используя формулы (3)–(5) можно вычислить ЭДС, токи короткого замыкания и внутреннее сопротивление 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.

Литература

1. Аблязимова Н.А., Вейнгер А.И., Питанов В.С. // ФТП, 1992. № 26 (6). С. 1041.
2. Гулямов Г., Гулямов А.Г. // ФТП, 2015. № 49 (6). С. 839.
3. Алиев К.М., Камиллов И.К., Ибрагимов Х.О., Абакарова Н.С. // ФТП, 2015. № 49 (3). С. 413.
4. Гулямов Г. // ФТП, 1996. № 30 (7). С. 1279.
5. Вейнгер А.И., Тиснек Т.В., Кочман И.В., Окулов В.И. // ФТП, 2017. № 51 (2). С. 172.
6. Алиев К.М., Камиллов И.К., Ибрагимов Х.О., Абакарова Н.С. // ФТП, 2012. № 46 (8). С. 1082.
7. Алиев К.М., Камиллов И.К., Ибрагимов Х.О., Абакарова Н.С. // ФТП, 2009. № 43. С. 517.
8. Алиев К.М., Камиллов И.К., Ибрагимов Х.О., Абакарова Н.С. // ЖТФ, 2011. № 81. С. 141.
9. Алиев К.М., Камиллов И.К., Ибрагимов Х.О., Абакарова Н.С. // Письма ЖТФ, 2011. № 37. С. 42.
10. Aliev K.M., Kamilov I.K., Ibragimov Kh.O., Abakarova N.S. // Sol. St. Commun., 2008. № 148. P. 171.