

## РАЗОГРЕВ ЭЛЕКТРОНОВ И ДЫРОК В НЕСИММЕТРИЧНОМ $p$ - $n$ -ПЕРЕХОДЕ, НАХОДЯЩЕМСЯ В СВЧ ПОЛЕ

М.Г. Дадамирзаев

Наманганский инженерно-педагогический институт

Физико-технический институт Академии наук Республики Узбекистан (Ташкент)  
Узбекистан

Поступила в редакцию 10.04.2013

Исследованы токи и ЭДС, возникающие в  $p$ - $n$ -переходах при воздействии сильного СВЧ поля с учетом одновременного разогрева электронов и дырок. Выявлено что, в несимметричном  $p$ - $n$ -переходе в сильном СВЧ поле для анализа напряжения и токов необходимо, учитывать как разогрев электронов, так и дырок. Установлено что, полный ток и генерируемое напряжение определяется не температурой горячих электронов, а температурой тех носителей, которые являются доминирующими.

**Ключевые слова:** горячий электрон, несимметричный  $p$ - $n$ -переход, термоЭДС, коэффициент неидеальности.

## РОЗІГРІВ ЕЛЕКТРОНІВ І ДІРОК У НЕСИМЕТРИЧНОМУ $p$ - $n$ -ПЕРЕХОДІ, ЯКИЙ ЗНАХОДИТЬСЯ В СВЧ ПОЛІ

М.Г. Дадамирзаєв

Досліджено струми та ЕДС, які виникають в  $p$ - $n$ -переходах за умови впливу сильного СВЧ поля з урахуванням одночасного розігріву електронів і дірок. Виявлено що, у несимметричному  $p$ - $n$ -переході в сильному СВЧ полі для аналізу напруги та струмів необхідно, враховувати як розігрів електронів, так і дірок. Установлено що, повний струм і напруга, яка генерується визначається не температурою гарячих електронів, а температурою домінуючих носіїв.

Ключові слова: гарячий електрон, несимметричний  $p$ - $n$ -перехід, термоЕДС, коефіцієнт неідеальності.

## THE HEATING OF ELECTRONS AND HOLES IN AN ASYMMETRIC $p$ - $n$ -JUNCTION, LOCATED IN THE MICROWAVE FIELD

M.G. Dadamirzaev

Studied currents and EMF arising pn-junctions under the influence of a strong microwave field with the simultaneous heating of electrons and holes. Revealed that, in asymmetric  $p$ - $n$ -junction in a strong microwave field for the analysis of voltage and current necessary to consider both the heating of the electrons and holes. Found that the total current and the generated voltage is not the temperature of hot electrons, and the temperature of the media, which are dominant.

**Keywords:** hot electron asymmetric  $p$ - $n$ -transition Seebeck coefficient of coupling

### ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] исследован несимметричный  $p$ - $n$ -переход в сильном СВЧ поле, когда концентрация дырок  $p_p$  в  $p$ -области гораздо больше концентрации электронов  $n_n$  в  $n$ -области. Однако, в работе [1] не учтено изменение температуры дырок  $T_h$ , считая эти изменения малыми по сравнению с изменениями температуры электронов  $T_e$ . В работе [2] исследовано влияние разогрева электронов и дырок на коэффициент неидеальности вольтамперной характеристики  $p$ - $n$ -перехода в сильном СВЧ поле. Выявлено, что в кремниевых образцах, несмотря на то, что температура элек-

тронов выше, чем температура дырок, коэффициент неидеальности ВАХ диода определяется температурой дырок. На основе теоретических исследований в [3] показано, что напряжение холостого хода  $U_{oc}$  несимметричного  $p$ - $n$ -перехода ( $p_p \gg n_n$ ), расположенного в СВЧ поле, определяется модуляцией высоты потенциального барьера, а также температурой дырок, несмотря на то, что  $T_e > T_h$ . В работах [2, 3] при исследовании температурной зависимости коэффициента неидеальности ВАХ диода  $m = f(T_e)$  считалось, что  $T_h = \text{const}$  а при исследовании зависимости  $m = f(T_h)$  считалось  $T_e = \text{const}$ . Также при исследовании

температурной зависимости напряжения холостого хода от температуры электронов и дырок делались такие же предположения. Они в реальном эксперименте никогда не выполняются. В самом деле, одновременно изменяются как температура электронов, так и температура дырок. Поэтому при анализе экспериментальных результатов необходимо учитывать одновременный разогрев как, электронов так и дырок.

Целью настоящей работы является исследование токов и ЭДС, возникающих в *p-n*-переходах при воздействии сильного СВЧ поля с учетом одновременного разогрева электронов и дырок.

### ВЛИЯНИЕ РАЗОГРЕВА ЭЛЕКТРОНОВ И ДЫРОК НА ВАХ НЕСИММЕТРИЧНОГО *p-n*-ПЕРЕХОДА

При больших мощностях СВЧ волны, когда  $T_e, T_h \neq T$ , ВАХ *p-n*-перехода определяется по формуле [3]:

$$\bar{j} = j_{se} \left\{ \left( \frac{T_e}{T} \right)^{1/2} e^{\left( \frac{e\phi_0 - e(\phi_0 - U)}{kT} \right)} \int_0^{2\pi} e^{\left( \frac{-eU_B \cos(\omega t)}{kT_e} \right)} \frac{d(\omega t)}{2\pi} - 1 \right\} + j_{sh} \left\{ \left( \frac{T_h}{T} \right)^{1/2} e^{\left( \frac{e\phi_0 - e(\phi_0 - U)}{kT} \right)} \int_0^{2\pi} e^{\left( \frac{-eU_B \cos(\omega t)}{kT_h} \right)} \frac{d(\omega t)}{2\pi} - 1 \right\}, \quad (2)$$

где,  $j_{se} = \frac{eD_e n_p}{L_e}$ ,  $j_{sh} = \frac{eD_h p_n}{L_h}$ ,  $U$  – напряже-

ние, возникающее на диоде,  $U_B = - \int_0^d E_B dx$  –

переменное напряжение падающей волны, созданное на барьере диода,  $T$  – температура решетки,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T_e$  и  $T_h$  – температуры электронов и дырок,  $E_B$  – напряженность электрического поля волны,  $e$  – заряд электрона,  $D_e$  и  $D_h$  – коэффициенты диффузии электронов и дырок,  $L_e$  и  $L_h$  – длины диффузии электронов и дырок,  $n_p$  и  $p_n$  – концентрации неосновных носителей заряда.

Если значения коэффициента диффузии, длины диффузии, подвижности и концентрации электронов и дырок для кремниевых *p-n*-переходов принять как в работах [3, 4], то формулу (2) можно записать в следующем виде:

$$\bar{j} = \sqrt{\frac{ekT_e}{\tau_e} T^{3,4}} \cdot 10^9 \frac{3 \cdot 10^{33} e^{-\frac{\Delta\varepsilon}{kT}}}{p_p} \times \left\{ \left( \frac{T_e}{T} \right)^{1/2} e^{\left( \frac{e\phi_0 - e(\phi_0 - U)}{kT} \right)} \int_0^{2\pi} e^{\left( \frac{-eU_B \cos(\omega t)}{kT_e} \right)} \frac{d(\omega t)}{2\pi} - 1 \right\} + \sqrt{\frac{ekT_h}{\tau_h} T^{3,7}} \cdot 2,5 \cdot 10^8 \frac{1,5 \cdot 10^{33} e^{-\frac{\Delta\varepsilon}{kT}}}{n_n} \times \left\{ \left( \frac{T_h}{T} \right)^{1/2} e^{\left( \frac{e\phi_0 - e(\phi_0 - U)}{kT} \right)} \int_0^{2\pi} e^{\left( \frac{-eU_B \cos(\omega t)}{kT_h} \right)} \frac{d(\omega t)}{2\pi} - 1 \right\}. \quad (3)$$

С помощью формулы (3) будем исследовать влияние разогрева электронов и дырок на ВАХ *p-n*-перехода в сильном СВЧ поле. Сначала считая, температуру дырок постоянной рассмотрим ВАХ при изменении температуры электронов. Поверхность для ВАХ *p-n*-перехода в трехмерном пространстве  $j, U, T_e$  приведена на рис. 1.

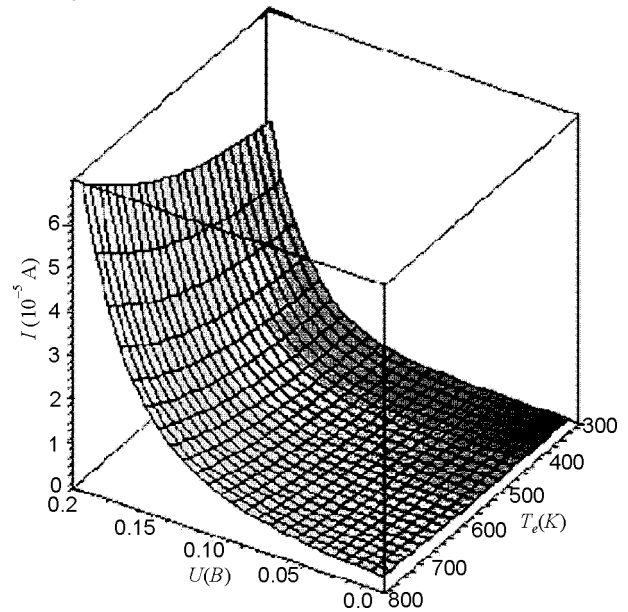


Рис. 1. Поверхность для ВАХ *p-n*-перехода в трехмерном пространстве ( $j, U, T_e$ ) при постоянной температуре дырок ( $T_h = \text{const}$ ).

Как видно из рис. 1 в интервале температуры электронов 300 – 800 К ток изменяется всего на 50%. Отсюда следует, что увеличение тока горячих носителей в несимметричном *p-n*-переходе ( $p_p \gg n_n$ ) почти не зависит от температуры электронов. На рис. 2 приведена ВАХ *p-n*-перехода в трехмерном простран-

тве ( $j$ ,  $U$ ,  $T_h$ ) при постоянной температуре электронов ( $T_e = \text{const}$ ).

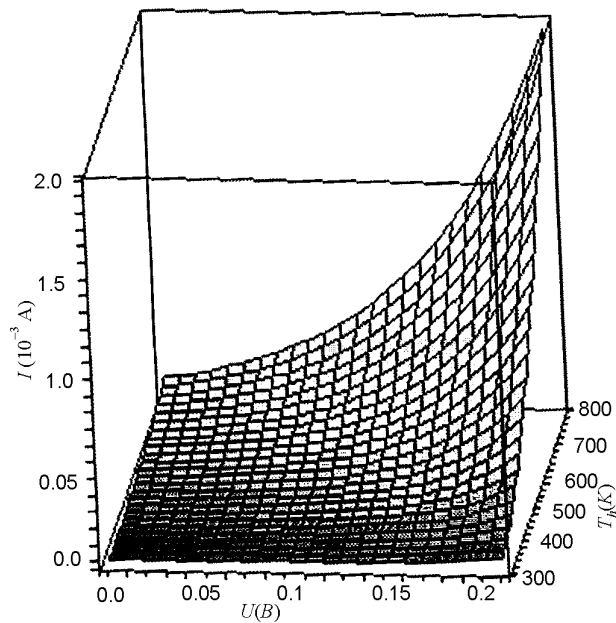


Рис. 2. ВАХ  $p$ - $n$ -перехода в трехмерном пространстве ( $j$ ,  $U$ ,  $T_h$ ) при постоянной температуре электронов ( $T_e = \text{const}$ ).

Как видно из рис. 2, при увеличении температуры дырок с 300 К до 800 К сила тока увеличивается больше чем на порядок. Такая сильная зависимость тока от температуры дырок свидетельствует о том, что основной ток определяется дырочным током. Линия пересечения поверхностей рис. 1 и рис. 2 должна давать реальный ВАХ  $p$ - $n$ -перехода для различных мощностей СВЧ волны. Из рис. 1 видно, что при  $T_h = \text{const}$  и  $n_n \ll p_p$  ВАХ диода почти не меняется, несмотря на то, что температура электронов увеличивается в три раза. Такая, нечувствительность ВАХ к температуре электронов объясняется тем, что ток через  $p$ - $n$ -переход определяется дырочным током ( $j_n \ll j_p$ ), температура дырок на таком же интервале влияет на ВАХ примерно, на порядок.

Анализ ВАХ  $p$ - $n$ -перехода в трехмерном пространстве ( $j_{кз}$ ,  $T_e$ ,  $T_h$ ) показал, что ток короткого замыкания сильно зависит от температуры дырок и почти не зависит от температуры электронов, и он лежит на приведенной поверхности  $f(j_{кз}, T_e, T_h)$ .

## СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

В работе [3] получены зависимости напряжения холостого хода  $U_{xx}$  от температуры элект-

ронов при постоянной температуре дырок  $T_h$ , а также зависимости напряжения холостого хода  $U_{xx}$  от температуры дырок при постоянной температуре электронов  $T_e$ . Однако, в этой работе теоретические расчеты не сравнивались результатами эксперимента. Проанализируем экспериментальные результаты работы [1], в этой работе приведены зависимости температуры электронов  $T_e$  и напряжения холостого хода  $U_{xx}$  от мощности СВЧ волны. Используя эти экспериментальные данные находим зависимость напряжения холостого хода  $U_{xx}$  от температуры электронов  $T_e$  (рис. 3).

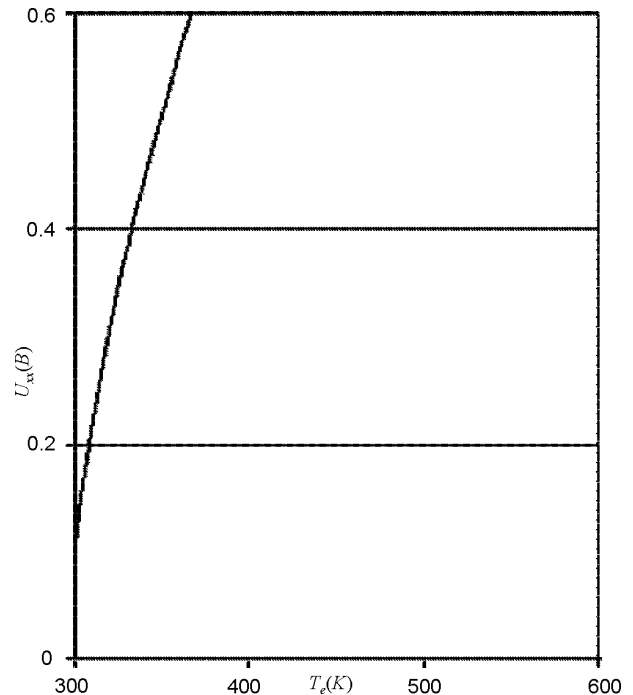


Рис. 3. Зависимость напряжения холостого хода  $U_{xx}(B)$  от температуры электронов  $T_e(K)$ .

Зависимость напряжения холостого хода  $U_{xx}(B)$  от температуры электронов  $T_e(K)$  (рис. 3) совпадает с полученными теоретическими результатами [3]. Для токов в  $p$ - $n$ -переходе, помещенной в сильное СВЧ поле, определяющей является температура дырок.

## ВЫВОДЫ

На плоскости  $T_e - T_h$  зависимость температур  $T_e$  и  $T_h$  от мощности дает некую кривую. Каждая точка в этой кривой соответствует одному единственному значению мощности СВЧ волны –  $P$ . С ростом мощности СВЧ волны температура электронов и дырок растет.

Отсюда следует, что  $\frac{\partial T_e}{\partial P} > 0$  и  $\frac{\partial T_h}{\partial P} > 0$ . С другой стороны с ростом мощности волны положение точки сдвигается в сторону высоких температур (рис. 4).

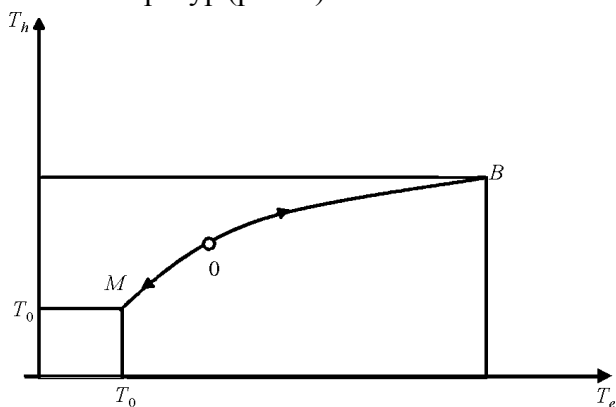


Рис. 4. Кривая, связывающая  $T_e$  и  $T_h$  для разных мощностей СВЧ волны.

С ростом мощности  $P$  точка 0 перемещается в сторону  $B$ , а при уменьшении  $P$  точка 0 сдвигается в сторону  $M$ . Если известна кривая  $MOB$  на плоскости  $T_e - T_h$  как функция мощности, то легко вычислить и сравнить с экспериментом  $U_{xx}$  как функции мощности.

Таким образом, в несимметричном  $p$ - $n$ -переходе в сильном СВЧ поле для анализа напряжения и токов необходимо, учитывать как разогрев электронов, так и дырок. Полный ток

и генерируемое напряжение определяется не температурой горячих электронов, а температурой тех носителей, которые являются определяющими.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аблязимова Н.А., Вейнгер А.И., Питанов В.С. //ФТП. – 1988. – Т. 22. – С. 2001.
2. Шамирзаев С.Х., Гулямов Г., Дадамирзаев М.Г., Гулямов А.Г.//ФТП. – 2009. –Т. 43, № 5.
3. Дадамирзаев М.Г.//ФТП. – 2011. – Т. 45. – С. 299.
4. Баранский П., Клочков В., Потыкевич И. Полупроводниковая электроника. Справочник. – К.: Наукова Думка, 1975. – 704 с.

#### LITERATURA

1. Ablyazimova N.A., Vejnger A.I., Pitanov V.S.// FTP. – 1988. – Т. 22. – S. 2001.
2. Shamirzaev S.H., Gulyamov G., Dadamirzaev M.G., Gulyamov A.G.//FTP. – 2009. –Т. 43, № 5.
3. Dadamirzaev M.G.//FTP. – 2011. – Т. 45. – S. 299.
4. Baranskij P.I., Klochkov V.P., Potykevich I.V. Poluprovodnikovaya 'elektronika. Spravochnik. – К.: Naukova Dumka, 1975. – 704 s.