

УДК 621.382.011.222

ВЫПРЯМЛЯЮЩИЕ СВОЙСТВА УЗКИХ КОНТАКТОВ МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК

Р.К.МАМЕДОВ

*Бакинский Государственный Университет
370145, Баку, ул. З.Халилова, 23*

В узких контактах металл-полупроводник (УКМП) ширина контактной поверхности имеет значение не более $2\div 3$ мкм. В таких УКМП электрическое поле контактной разности потенциалов между контактными поверхностями металла и полупроводника (основное электрическое поле) и электрическое поле контактной разности потенциалов между контактной поверхностью и к ней примыкающими свободными поверхностями металла и полупроводника (дополнительное электрическое поле) в целом сосредотачиваются в приконтактной области полупроводника. Под действием дополнительного электрического поля, как высота потенциального барьера УКМП, так и характер ее зависимости от приложенного напряжения меняются. Омические КМП по модели Шоттки приобретают выпрямляющие свойства из-за влияния дополнительного электрического поля.

При непосредственном контакте металла с полупроводником, возникают контактные разности потенциалов как между контактирующими поверхностями металла и полупроводника, имеющими работу выхода порядка $4\div 5$ эВ, так и между контактной поверхностью границы раздела, имеющей высоту потенциального барьера порядка 1 эВ и к ней примыкающими свободными поверхностями металла и полупроводника. Основное электрическое поле, возникающее из-за контактной разности потенциалов между контактирующими поверхностями металла и полупроводника, охватывает всю приконтактную область полупроводника [1], а дополнительное электрическое поле, возникающее из-за контактной разности потенциалов между контактной поверхностью границы раздела и к ней примыкающими свободными поверхностями металла и полупроводника, охватывает периферийную приконтактную область полупроводника [2]. Когда ширина контактной поверхности границы раздела составляет несколько микрометров как основное, так и дополнительное электрические поля полностью охватывают всю приконтактную активную область полупроводника [3]. Следовательно, в таких узких контактах металл-полупроводник (УКМП) основное и дополнительное электрические поля совместно оказывают влияние как на образование потенциального барьера, так и на токопрохождение.

Для определенности рассмотрим УКМП с однородной границей раздела, созданный на основе контакта металла с работой выхода Φ_M по всей поверхности и полупроводниковой пластинки n-типа с работой выхода Φ_n (электронным сродством χ) по всей рабочей поверхности. Согласно модели Шоттки [1], где не учитывается геометрическая ограниченность контактной поверхности границы раздела и наличие дополнительного электрического поля в приконтактной области полупроводника, непосредственный контакт металла с полупроводником n-типа при $\Phi_M - \Phi_n \approx 0$ ($\Phi_n = \Phi_M - \chi$) не имеет приконтактного обедненного слоя (Рис.1а), следовательно обладает омическими свойствами и его энергетическая диаграмма изображается как показано на Рис.1б. Однако, возникновение контактных разностей потенциалов $(\Phi_M - \Phi_n)/q$ и $(\Phi_n - \Phi_n)/q$ между контактной поверхностью границы раздела и к ней примыкающими свободными поверхностями металла и полупроводника свидетельствуют о появлении дополнительного электрического поля, которое проникает в приконтактную область полупроводника на глубину l_0 (рис.1в). Напряженность дополнительного поля E_d направлена от контактной

поверхности к свободным поверхностям металла и полупроводника. При этом в приконтактной области полупроводника тангенциальные составляющие напряженности дополнительного электрического поля взаимно компенсируются и его нормальные составляющие играют основную роль в процессе накопления свободных электронов на границе раздела и, следовательно, образования приконтактного обедненного слоя на глубине l_0 и в нем потенциального барьера высотой $\Delta\Phi_{в0}$ (Рис.1г). Максимум потенциального барьера находится на относительно большем расстоянии ($x_{м0}$) от поверхности металла, чем это следует из влияния силы изображения для идеального диода Шоттки.

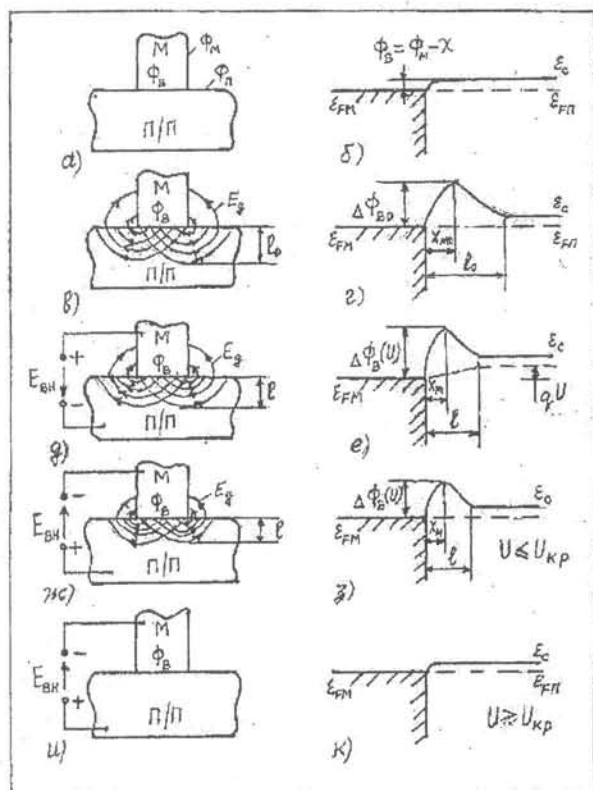


Рис.1.

Энергетические диаграммы узких "омических" КМП с дополнительным электрическим полем.

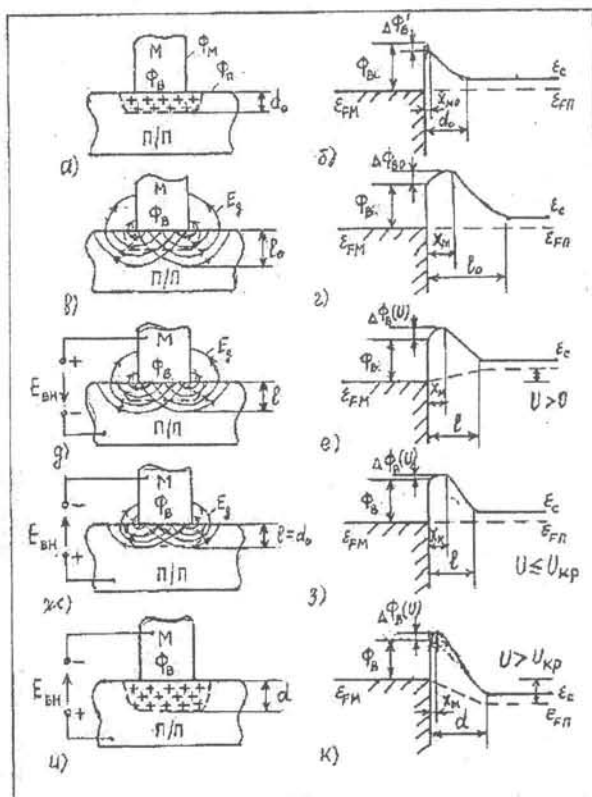


Рис.2.

Энергетические диаграммы узких "выпрямляющих" КМП с дополнительным электрическим полем.

Согласно теории термоэлектронной эмиссии [1], в случае отсутствия внешнего напряжения, через границу раздела в противоположных направлениях проходят токи I_0 , где

$$I_0 = SAT^2 \exp(-\Delta\Phi_{в0}/kT). \quad (1)$$

Здесь S - площадь контактной поверхности, A - константа Ричардсона, T - абсолютная температура, k - постоянная Больцмана.

При приложении внешнего прямого напряжения $U > 0$ (плюс к металлу), в обедненном слое полупроводника направления напряженностей внешнего поля $E_{вн}$ и дополнительного поля E_d совпадают (Рис.1д). Для электронов, эмитированных из полупроводника в металл, высота барьера уменьшается на величину qU (Рис.1е). В тоже время, сама высота барьера увеличивается на величину $\beta_1 qU$, т.е.

$$\Delta\Phi_{в} = \Delta\Phi_{в0} + \beta_1 qU \quad (2)$$

где $\beta_1 < 1$. Согласно теории термоэлектронной эмиссии, зависимость тока от напряжения в прямом направлении выражается формулой:

$$\begin{aligned} I_{пр} &= SAT^2 \exp(-\Delta\Phi_{в} / kT) [\exp(qU / kT) - 1] = \\ &= SAT^2 \exp[-(\Delta\Phi_{во} + \beta_1 qU) / kT] [\exp(qU / kT) - 1] = \\ &= I_0 [\exp((1 - \beta_1)qU / kT) - \exp(-\beta_1 qU / kT)] = \\ &= I_0 [\exp(qU / n_1 kT) - \exp((1 - n_1)qU / n_1 kT)] \approx I_0 \exp(qU / n_1 kT), \end{aligned} \quad (3)$$

где $n_1 = 1 / (1 - \beta_1)$.

При приложении внешнего обратного напряжения $U < 0$ (минус к металлу) напряженность внешнего поля $E_{вн}$ и дополнительного поля $E_{д}$ в обедненном слое полупроводника направлены противоположно (Рис.1ж). С ростом напряжения дополнительное поле частично компенсируется внешним полем и, следовательно, уменьшается количество свободных электронов, накопленных на границе раздела. При этом уменьшается и высота потенциального барьера для электронов, идущих через контакт в противоположных направлениях (Рис.1з). Обратный ток начинает протекать лишь в том случае, когда $\Delta\Phi_{во}$ полностью компенсируется внешним напряжением $U_{кр}$ (Рис.1и) [4]. При $U > U_{кр}$ обратный ток имеет омический характер (Рис.1к), т.е.

$$I_{об} = (U - U_{кр}) / R_c, \quad (4)$$

где R_c - сопротивление контакта.

Согласно модели Шоттки, где не учитывается дополнительное электрическое поле, когда $\Phi_M > \Phi_B$ в приконтактной области полупроводника образуется обедненный слой с глубиной d_0 (Рис.2а) и в нем формируется потенциальный барьер с высотой $\Phi_{в}$, который находится на расстоянии $x_{м0}$ от поверхности металла и снижается на величину $\Delta\Phi_{в}'$ под действием силы зеркального изображения (Рис.2б). Возникающее дополнительное электрическое поле проникает в приконтактный слой полупроводника на глубину $l_0 > d_0$ (рис.2в), в результате чего потенциальный барьер увеличивается на $\Delta\Phi_{во}$ и его максимум находится на достаточно большом расстоянии $x_M > x_{м0}$ (Рис.2г). При этом под действием дополнительного электрического поля свободные электроны за пределами d_0 накапливаются на границе раздела.

При приложении внешнего прямого напряжения, напряженности внешнего поля $E_{вн}$ и дополнительного поля $E_{д}$ в обедненном слое полупроводника направлены параллельно (Рис.2д). С ростом напряжения высота барьера уменьшается на величину qU для электронов, эмитированных из полупроводников в металл (Рис.2е). В то же время сама высота барьера увеличится на величину $\beta_1 qU$, т.е.

$$\Delta\Phi_{в} = \Delta\Phi_{во} + \beta_1 qU, \quad (5)$$

где $\beta_1 < 1$. Согласно теории термоэлектронной эмиссии зависимость тока от прямого напряжения выражается формулой:

$$\begin{aligned} I_{пр} &= SAT^2 \exp[-(\Phi_{в} + \Delta\Phi_{в} / kT)] [\exp(qU / kT) - 1] = \\ &= SAT^2 \exp[-(\Phi_{в} + \Delta\Phi_{во} + \beta_1 qU) / kT] [\exp(qU / kT) - 1] = \\ &= SAT^2 \exp(-\Phi_{вз} / kT) [\exp((1 - \beta_1)qU / kT) - \exp(-\beta_1 qU / kT)] \approx \\ &\approx SAT^2 \exp(-\Phi_{вз} / kT) [\exp(qU / n_1 kT)], \end{aligned} \quad (6)$$

где $\Phi_{в} = \Phi + \Delta\Phi_{во}$ и $n_1 = 1 / (1 - \beta_1)$.

При приложении внешнего обратного напряжения, напряженности внешнего поля $E_{вн}$ и дополнительного поля $E_{д}$ в обедненном слое полупроводника направлены

противоположно (Рис.2ж). С ростом напряжения до значения $U_{кр}$ дополнительное поле частично компенсируется внешним полем, и дополнительно накопленные электроны на границе раздела постепенно освобождаются. Это означает, что при $U \leq U_{кр}$, где ($l \geq d_0$), через контакт обратный ток не протекает (Рис.2з), а при $U > U_{кр}$, где ($l < d_0$), через контакт начинает протекать обратный ток (Рис.2и). Уменьшение высоты барьера с ростом напряжения (Рис.2к) выражается формулой:

$$\Delta \Phi_b = \Delta \Phi_{во} - \beta_2 q U, \quad (7)$$

тогда, согласно теории термоэлектронной эмиссии, зависимость обратного тока от напряжения выражается формулой:

$$\begin{aligned} I_{обр} &= SAT^2 \exp[-(\Phi_b + \Delta \Phi_b)/kT][\exp(-q(U-U_c)/kT) - 1] = \\ &= SAT^2 \exp[-(\Phi_b + \Delta \Phi_{во} - \beta_2 q U)/kT][\exp(-q(U-U_c)/kT) - 1] \approx \\ &\approx SAT^2 \exp(-\Phi_{вз}/kT) \exp[q(U-U_{кр})/n_2 kT], \end{aligned} \quad (8)$$

где $\Phi_{вз} = \Phi_b + \Delta \Phi_{во}$; $n_2 = 1/\beta_2$ и $U > U_{кр}$.

В формуле (8) внешнее напряжение $U = U_c$ компенсирует приращение высоты барьера, обусловленное накоплением свободных электронов в области $l > d_0$ на границе раздела. При $0 < U_c \leq U_{кр}$ обратный ток через контакт не протекает. В прямом направлении $U_c = 0$.

Общее выражение вольтамперной характеристики УКМП описывается формулой:

$$I = SAT^2 \exp[-(\Phi_{вз} + \beta q U)/kT][\exp(q(U-U_c)/kT) - 1], \quad (9)$$

где $U_c = 0$ при прямом направлении ($U > 0$) и $0 \leq U_c \leq U_{кр}$ при обратном направлении ($U < 0$).

Когда дополнительное электрическое поле проникает в полупроводник на глубину $l \leq d_0$, критическое напряжение $U_{кр} = 0$ ($U_c = 0$), и через УКМП как прямые, так и обратные токи начинают протекать сразу же с ростом напряжения начиная от нуля.

Выше представленные свойства УКМП находятся в хорошем согласии с результатами исследований токопрохождения в реальных диодах Шоттки с помощью сканирующих электронных микроскопов, где наглядно демонстрируются особенности локализации токов в отдельных микроучастках и ее зависимости от полярности приложенного напряжения [5,6].

1. С.М.Зи, *Физика полупроводниковых приборов*, М., "Энергия", (1973) 650.
2. R.G.Mamedov, *Proceeding of the 4-th Baku International Congress on Energy, Ecology, Economy*, Baku, (1997) 205.
3. P.K.Mamedov, M.A.Nabiev, *ФТП*, **20** (1986) 332.
4. P.K.Mamedov, *Изв. АН.Аз.ССР, серия физ.мат.тех.наук*, №5 (1984) 73.
5. R.B.Marcus, S.E.Haszko, S.P.Murarka, J.C.Irvin, *J. Elektrochem. Soc.: Solid-State science and technology*, **121** (1974) 692.
6. G.J.Russel, M.J.Robertson, J.Woods, *Phys. Statys Solidi*, (**a**)**57** №1 (1980) 253.

ENSİZ METAL-YARIMKEÇİRİJİ KONTAKTLARIN DÜZLƏNDİRMƏ XASSƏLƏRİ

R.Q.MƏMMƏDOV

Ensiz metal-yarımkeçirijli kontaktlarda (EMYK) kontakt səthinin eni 2-3mkm-dən kiçik olur. Belə EMYK-larda metal və yarımkeçirijinin kontakt səthləri arasındakı potensiallar fərqi elektrik sahəsi (əsas elektrik sahə) və sərhəddin kontakt səthi ilə onu əhatə edən metal və yarımkeçiricinin sərbəst səthləri arasındakı potensial fərqi elektrik sahəsi (əlavə elektrik sahə) bütövlüklə yarımkeçirijinin kontaktaltı hissəsində yerləşir. EMYK-nın həm potensial çəpərinin hündürlüyü, həm də onun xarici gərginlikdən asılılıq xarakteri əlavə elektrik sahəsinin təsirindən dəyişir. Şottki modelinə görə omik MYK əlavə elektrik sahəsinin təsiri ilə düzləndirmə xassələri kəsb edir.

THE RECTIFICATION PROPERTIES OF NARROW METAL-SEMICONDUCTOR CONTACTS

R.K.MAMEDOV

The width of the contact surface isn't more than $2\div 3\mu\text{m}$ in narrow metal-semiconductor contacts (NMSC). In such NMSC, the electrical field of contact potential difference between contact surface of the metal and semiconductor (main electrical field) and electrical field of contact potential difference between contact surface and adjacent to itself free surface of the metal and semiconductor (additional electrical field) as a whole concentrates in the peripheral contact region of the semiconductor. Under operating of an additional electrical field, the potential barrier height of the NMSC and also character its changes, versus the applied electrical field. The ohmic metal-semiconductor contact, by the Schottky model, shows rectification properties, because of effect of the additional electrical field.

Редактор: Э.Джафарова.