

УДК 621. 382

РОЛЬ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ТУННЕЛИРОВАНИЯ В ДИОДАХ ШОТТКИ

И.М ЭФЕНДИЕВА

*Бакинский Государственный Университет
370148, Баку, ул. З.Халилова, 23*

В статье рассматривается влияние последовательного сопротивления на параметры диодов Шоттки. В преобразованиях функции Норде учитывается роль туннелирования через барьер. Полученные теоретическим путем результаты применены для вычисления последовательного сопротивления и высоты потенциального барьера диода Шоттки (Al-TiW+PtSi)-nSi

Вольт-амперная характеристика идеального диода Шоттки, в котором перенос тока осуществляется путем термоэлектронной эмиссии, описывается как

$$I = I_s \left[\exp \frac{qV_d}{kT} - 1 \right], \quad (1)$$

где $I_s = SAT^2 \left(-q\phi_b / kT \right)$ - ток насыщения, определяемый при экстраполяции вольт-амперной характеристики к $V=0$, V_d - напряжение на диоде, S - контактная площадь диода, A - постоянная Ричардсона, ϕ_b - высота потенциального барьера.

Хорошо известен метод определения высоты барьера идеального диода из зависимости $\ln I(V)$. Однако, различные физические процессы, протекающие на контакте металл-полупроводник могут существенно изменить форму вольт-амперной характеристики. Наличие диэлектрического зазора, поверхностных состояний, туннелирования через потенциальный барьер, сил зеркального изображения, процессов генерации-рекомбинации - все это приводит к получению, в конечном итоге, всевозможных модификаций вольт-амперной характеристики [1].

Большую трудность в определении параметров контактов металл-полупроводник создает последовательное сопротивление диода, увеличение роли которого при больших значениях приложенного напряжения приводит к отклонению вольт-амперной зависимости от прямой линии. Прямолинейный участок вольт-амперной характеристики имеет место в определенном интервале значений приложенного напряжения (Рис.1)

$$kT/q \ll V \ll IR_s,$$

где R_s - последовательное сопротивление диода.

При напряжениях более $V_{\max} = IR_s$ наблюдается слабый рост тока. Проблему последовательного сопротивления можно исключить использованием некоторой функции, введенной Г.Норде [2] и используемой при определении параметров идеальных контактов металл-полупроводник

$$F(V) = \left(\frac{V}{2}\right) - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I}{SA^*T^2}\right). \quad (2)$$

Учитывая, что

$$V_d = V - IR_s, \quad (3)$$

где V - приложенное напряжение, получим

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{q}{kT} V_d\right) - 1 \right] = I_s \left\{ \exp\left[\frac{q}{kT} (V - IR_s)\right] - 1 \right\}. \quad (4)$$

Используя функцию Норде, можно определить высоту потенциального барьера и величину последовательного сопротивления диода.

Однако, последовательное сопротивление не единственная причина отклонения вольт-амперной характеристики от идеальной, как отмечалось выше. Отклонение вольт-амперной характеристики от идеальной в общем случае отмечается введением в уравнение (1) коэффициента неидеальности

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)}, \quad (5)$$

тогда в общем виде зависимость тока от напряжения для неидеального диода будет записана как

$$I = I_s \exp\left(\frac{qV_d}{nkT}\right). \quad (6)$$

В случае сильнолегированного полупроводника и низких температур, когда барьер достаточно высокий и узкий, вероятность туннелирования через барьер велика. Учет туннелирования в описании вольт-амперной зависимости приводит к учету показателя неидеальности в выражении для тока насыщения, тогда

$$I = SA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{nkT}\right). \quad (7)$$

Используя выражения (2), (3) и (7) и проведя преобразования, получим функцию Норде для контакта металл-полупроводник с учетом туннелирования

$$F(V) = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n}\right)V + \frac{IR_s}{n} + \frac{\phi_b}{n}. \quad (8)$$

Для предельного случая с $R_s = 0$ $F(V)$ представляется на графике прямой с наклоном $\left(n - \frac{2}{2n}\right)$. В случае идеальной вольт-амперной характеристики наклон $F(V)$ равен $1/2$ и экстраполяцией зависимости можно получить высоту потенциального барьера ϕ_b . В случае же существенной роли туннелирования экстраполяцией можно получить значение ϕ_b/n

$$\phi_b = n \left[F(V) - V \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n} \right) - \frac{IR_s}{n} \right]. \quad (9)$$

С другой стороны, если сопротивление довольно велико, то, учитывая его, получим:

$$F(V)_R = \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{V}{SA^*T^2R_s} \right). \quad (10)$$

Для больших напряжений график зависимости $F(V)$ - прямая с наклоном $+1/2$.

Дифференцируя (10) по напряжению, получим

$$\frac{dF(V)}{dV} = \left(\frac{n-2}{2n} \right) + \frac{R_s}{n} \left(\frac{dI}{dV} \right). \quad (11)$$

Учитывая (2) и находя из условия минимума $\frac{dF(V)}{dV} = 0$, получим

$$I_o = \frac{(2-n)kT}{qR_s} \quad (12)$$

и можно вычислить величину последовательного сопротивления R_s

$$R_s = \frac{(2-n)kT}{qI_o} \quad (13)$$

и высоту потенциального барьера ϕ_b диода с учетом туннельного тока

$$\phi_b = n \left[F(V_o) - V_o \left(\frac{n-2}{2n} \right) - \frac{I_o R_s}{n} \right]. \quad (14)$$

С целью подтверждения правильности полученного нами толкования определения высоты потенциального барьера с использованием функции Норде при наличии туннелирования, были проведены вычисления ϕ_b и R_s для диода Шоттки ($Al-TiW + PtSi$) - nSi , полученного методом магнетронного распыления. Контакт $PtSi-nSi$ представляет большой интерес, обусловленный, прежде всего, высоким потенциальным барьером [4]. В результате отжига, проводимого при 510С, происходит диффузия Pt в Si . Образование силицида платины обеспечивает лучшее сопряжение решеток двух материалов, смещение границы раздела вглубь полупроводника, отсутствие окисного слоя, диэлектрического зазора, исключает воздействие внешней среды, сводит к минимуму число поверхностных состояний.

Традиционно используемый с целью металлизации алюминий обладает большой диффузионной способностью, приводящей к образованию контакта $Al-nSi$ и, как следствие, понижению потенциального барьера. Для предотвращения отрицательного воздействия алюминия на качество контакта $PtSi-nSi$ в исследуемых диодах использован аморфный сплав TiW , играющий роль диффузионного барьера. В качестве подложки использован $n-Si$ с ориентацией (111) марки КЭФ -0.7.

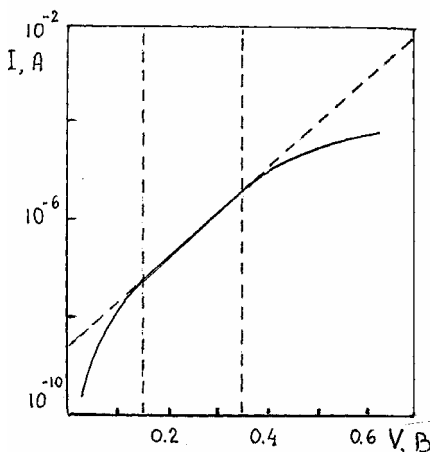
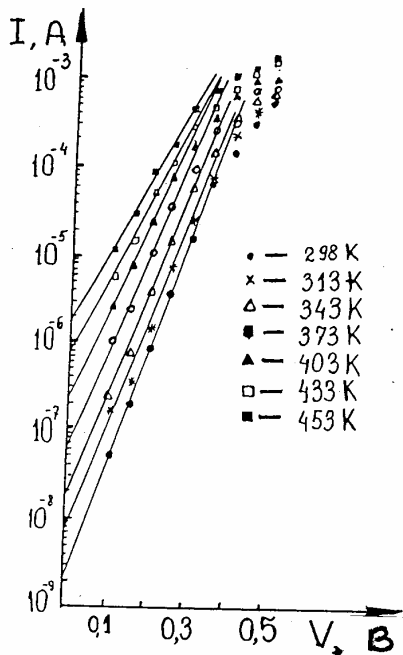


Рис.1.

Вольт-амперная характеристика диода Шоттки с последовательным сопротивлением.

Нами были получены вольт-амперные характеристики диодов $(Al-TiW + PtSi) - nSi$ с размерами $(1 \div 14) \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$ в интервале температур $(298 \div 453) \text{ K}$ и напряжений $(0.1 \div 0.5) \text{ В}$ в прямом и $(0.1 \div 20) \text{ В}$ обратном направлениях. С учетом выполнения всех критериев диодной теории для исследуемых объектов были вычислены значения показателя неидеальности, выявлена его зависимость от температуры. Сравнение результатов, полученных для диодов с различными площадями, выявило отсутствие зависимости параметров от геометрических размеров диодов, что свидетельствует об однородности границы раздела и одинаковом механизме переноса.

В этой связи в представленной статье приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) и зависимости $n(T)$ для диодов с площадью $7 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$



(Рис.2. и Рис.3.). Для всех диодов характерно минимальное значение n при 373 K [5]. Излом, существующий в зависимости $n(T)$, свидетельствует о наличии нескольких механизмов переноса в контакте металл-полупроводник. Проведенные нами ранее исследования с использованием модели тесного контакта позволили сделать вывод о преобладании туннелирования через барьер в интервале температур $(298 \div 373) \text{ K}$ и механизма термоэлектронной эмиссии в интервале $(373 \div 453) \text{ K}$ [6,7]. При температуре 373 K оба механизма равноправны. Однако, с повышением температуры в интервале $(373 \div 453) \text{ K}$ наблюдается незначительное отличие показателя неидеальности от единиц.

Рис.2.

ВАХ диода Шоттки $(Al-TiW+PtSi)-nSi$ в интервале температур $(298-458) \text{ K}$, $S=7 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$.

Известно, что при температурах ниже 300 K и степени легирования $N > 10^{16} \text{ см}^{-3}$ перенос заряда через КМП осуществляется посредством туннелирования. В представленной статье приводятся результаты исследований, проводимых в граничной области температур и степени легирования.

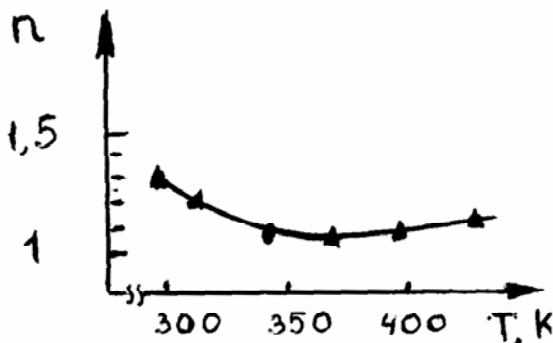


Рис.3.

Зависимость показателя неидеальности от температуры.

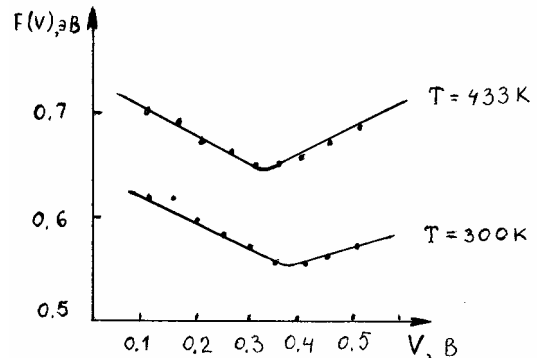


Рис.4.

Расчетная зависимость $F(V)$ для диода Шоттки $(Al-TiW+PtSi)-nSi$.

Атомы и вакансии, диффундировавшие в полупроводник в процессе образования силицида платины могут играть роль доноров. Это, в свою очередь, может привести к возрастанию концентрации носителей и понижению барьера. В возникшей ситуации вероятность присутствия механизма термо-полевой эмиссии при переносе тока велика.

Принимая во внимание отсутствие диэлектрического зазора и увеличение вероятности перехода носителей заряда с энергией, большей высоты потенциального барьера, в области пространственного заряда полупроводника можно предположить, что отклонение ВАХ от идеальной в области температур ближе к 453К связано с влиянием нарушения равновесной функции распределения электронов.

На основе вольт-амперных характеристик была построена зависимость $F(V)$ (Рис.4.) для диода с размером площади $7 \cdot 10^{-6} \text{см}^2$ и вычислены с учетом туннелирования высота потенциального барьера ϕ_b и величина последовательного сопротивления диода R_s при $T=300\text{K}$: $\phi_b=0.81\text{эВ}$ $R_s=126.5\text{Ом}$; а при $T=433\text{K}$ - $\phi_b=0.87\text{эВ}$ и $R_s=43\text{Ом}$. Полученные результаты хорошо коррелируют с известными из литературы [2] и полученными нами ранее.

1. В.И.Стриха, *Теоретические основы работы контакта металл-полупроводник*, К., "Наукова Думка", (1974) 263.
2. H.Norde, *J.Appl. Phys.*, **50** (1979) 5052.
3. A.J.Hamdani, *Solar Energy and Islamic countries (SEIC), IRAN, Tehran*, 6-9 November (1995) 547.
4. T.Vdovenkova, V.Strikha, F.Cardon et.al., *J .Electron Spectrosc. and Relat. Phenom.*, **105** (1999) 15.
5. Zhang Yuming, Luo Jinsela, *Chin. J. Semicond*, **20** (1999) 1040.
6. Ş.Q.Əsgərov, İ.M.Əfəndiyeva, M.Ə.Qəmbərzadə, M.H.Nəsənov, *Fizika*, **V** №2 (1999) 84.
7. И.М.Эфендиева, М.А. Ганбарзаде, М.Н. Агаев, Л.К.Абдуллаева, *Физика*, **VI** №1 (2000) 9.

ŞOTTKI DİODLARINDA ARDICIL MÜQAVİMƏTİN VƏ TUNNELLƏŞMƏNİN ROLU

İ.M.ƏFƏNDİYEVƏ

Nəzəri metodların və eksperimental nəticələrin istifadə edilməsilə Şottki diodunun potensial baryer hündürlüyü və ardıcıl müqaviməti hesablanmışdır. Norde funksiyasının çevrilmələrində tunnel cərəyanının mövcud olması nəzərə alınmışdır. Alınmış nəticələr $(Al-TiW+PtSi)-nSi$ Şottki diodlarının ardıcıl müqavimətinin və potensial baryer hündürlüyünün hesablanması üçün tətbiq olunmuşdur.

THE ROLE SERIES RESITIVITY AND TUNNELLING AT THE SHOTTKY DIODES

I.M.EFENDIYEVA

Based on theoretical and experimental data, the potential barriers height and the series resistivity have been calculated. When using the Norde function, the tunnelling current has been taken into account, obtained the series resistivity and potential barriers height for $(Al-TiW+PtSi)-nSi$ Schottky diodes.

Редактор: Т.Мамедов