

# ТЕРМОВОЛЬТАИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ВАРИЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Шукрулло Усмонов<sup>1, 2\*</sup>, Александр Мягкий<sup>3, 4</sup>, Амин Саидов<sup>1</sup>, Саида Усмонова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт Академии наук Республики Узбекистан  
Ташкент, 100084, Узбекистан, e-mail: sh\_usmonov@rambler.ru, amin@uzsci.net

<sup>2</sup>Чирчикский государственный педагогический институт  
Чирчик, 111700, Узбекистан

<sup>3</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
Харьков, 61166, Украина, e-mail: aleksandr.mjagky@nure.ua

<sup>4</sup>Общество с ограниченной ответственностью «Будущее в Зеленой Энергетике»  
Клинцы, 243146, Россия

## Аннотация

Исследовано возникновение термоэлектродвижущей силы в варизонных полупроводниках при отсутствии градиента температуры. Приведены термоэлектрические уравнения, которые описывают возникновение термостимулированные разности потенциалов и тока в варизонных полупроводниках при их нагреве без градиента температуры.

**Ключевые слова:** термовольтаический эффект, варизонный полупроводник, термоэлектродвижущая сила.

## 1. Введение

В последнее время был обнаружен новый эффект – возникновение электродвижущей силы (эдс) в полупроводниковых образцах (без всяких гомо-, гетеро- или изотипных переходов, без барьеров типа металл-полупроводник и т.д.) при их нагреве без градиента температуры вдоль образца. В последствие этот эффект был назван термовольтаическим. Экспериментальные результаты, проведенные в различных научных центрах, показали, что этот эффект наблюдается в различных полупроводниковых образцах с неоднородным составом, в частности, в полукристаллическом кремнии, полученного переплавкой на солнечной печи технического кремния марки КРЗ [1-4], в поликристаллическом образце сульфида-самария (SmS) с искусственно созданным градиентом концентрации избыточных относительно стехиометрического состава ионов самария [5-7], в оксиде цинка (ZnO), неоднородно легированного примесями с переменной валентностью [8], в pSi-n(Si<sub>2</sub>)<sub>1-x</sub>(ZnS)<sub>x</sub> структуре с плавно изменяющимся составом твердого раствора (Si<sub>2</sub>)<sub>1-x</sub>(ZnS)<sub>x</sub> [9], в nGe-p(InSb)<sub>1-x</sub>(Sn<sub>2</sub>)<sub>x</sub> структуре с варизонным слоем из твердого раствора (InSb)<sub>1-x</sub>(Sn<sub>2</sub>)<sub>x</sub> [10], в варизонных твердых растворах кремний-германия Si<sub>1-y</sub>Ge<sub>y</sub> (0.2 ≤ y ≤ 1) с плавно изменяющимся составом [11]. Несмотря на достаточное количество экспериментальных результатов, в данное время отсутствует единой теории, объясняющей возникновения термовольтаического эффекта. В данной работе рассмотрены возможности возникновения термостимулированной эдс в полупроводниковых образцах с неоднородным составом, в частности в варизонных полупроводниках при их нагреве без градиента температуры.

## 2. Возможности возникновения термостимулированной эдс при однородном нагреве

Рассмотрим полупроводник с неоднородным составом, в котором концентрация носителей заряда – как электронов, так и дырок, достаточно для возникновения ощутимого электрического тока при его возбуждении. Обозначим через  $T_k$  температуры электронного газа ( $k = 1$ ) в полупроводнике, или – дырок ( $k = 2$ ). Пусть образец не имеет внутренних энергетических барьеров, образованных неизотипными переходами, гетеропереходами или переходами типа металл-полупроводник. Воспользуемся выражением, связывающего напряженности электрического поля ( $E$ ) и электрического потенциала ( $\varphi$ ) -  $E = -\text{grad}\varphi$ , законом Ома  $\varepsilon = I \cdot R$ , где  $I$  – сила тока,  $R$  – полное электрическое сопротивление контура, в случае с единичным поперечным сечением контура  $R = \oint (1/\sigma) dx$ ,  $\sigma$  – полная электропроводность контура. Возникновение парциального тока в образце неоднородного состава при его нагреве можно описать уравнением:

$$j_k = -\sigma_k \left( \frac{d}{dx} \tilde{\varphi}_k + \alpha_k \frac{d}{dx} T_k \right), \quad (1)$$

где  $j_k$  – плотность тока,  $\sigma_k$  – электропроводность,  $\tilde{\varphi}_k = F_k/e_k = \varphi + \mu_k/e_k$  – электрохимический потенциал,  $F_k$  – квазиуровень Ферми,  $e_k$  – электрический заряд,  $\mu_k$  – химический потенциал,  $\alpha_k$  – коэффициент термо эдс для  $k$ -того сорта носителя заряда. Первый член в скобке в выражение (1) описывает термовольтаический эффект, а второй – классический термоэлектрический эффект. Возникающий термо эдс с участием всех сортов носителей тока описывается следующим выражением:

$$\varepsilon = -\oint \sum_{k=1}^N \frac{\sigma_k}{\sigma} \left( \frac{d}{dx} \tilde{\varphi}_k + \alpha_k \frac{d}{dx} T_k \right) dx, \quad (2)$$

где  $\sigma = \sum_{k=1}^N \sigma_k$ . Следует отметить, что температура  $T_k$  входит в уравнение (2) в двух слагаемых: в первое – скрыто в  $\tilde{\varphi}_k(T)$  и во второе – напрямую как градиент  $T_k$ . В случае, когда отсутствует градиент температуры вдоль образца ( $T_k = \text{const}$ ) второе слагаемое в (2) обращается в нуль. Предположим, что контур состоит из нескольких  $m$  слоев неоднородного состава (варизонные материалы, переменное легирование, изменение стехиометрического состава бинарных соединений и т.п.), то тогда конечное уравнение в общем виде, будет иметь следующий вид:

$$\varepsilon = -\sum_{i=1}^m \left[ \oint \sum_{k=1}^N \frac{\sigma_{k,i}}{\sigma} \left( \frac{d}{dx} \tilde{\varphi}_{k,i} + \alpha_{k,i} \frac{d}{dx} T_{k,i} \right) dx \right] \quad (3)$$

где  $i$  – номер соответствующего слоя.

Рассмотрим случае единичного варизонного слоя полупроводника. Пусть температура в образце будет постоянной  $T_k = \text{const}$ . В этом случае эдс возникает тогда, когда выполняется условие

$$\psi = \left( \frac{\mu_2}{e_2} - \frac{\mu_1}{e_1} \right) \neq \text{const}, \quad (4)$$

так и выполняется соотношение для электропроводности:  $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \neq \text{const}$ .

Проведя замену переменных относительно  $\varphi$  получим :

$$\varepsilon = \oint \frac{\sigma_1}{\sigma} \frac{d}{dx} \left( \frac{\mu_2}{e_2} - \frac{\mu_1}{e_1} \right) dx = \oint \frac{\sigma_2}{\sigma} \frac{d}{dx} \left( \frac{\mu_1}{e_1} - \frac{\mu_2}{e_2} \right) dx. \quad (5)$$

Очевидно, что появление термо эдс обуславливается неравностью и неоднородностью среды, а также ее биполярностью ( $N = 2$ ) и являются в частности, теми известными условиями для возникновения термо эдс в полупроводнике при  $T_k = \text{const}$ . Таким образом, в разомкнутой цепи возникает термо эдс, а при замыкании цепи течет электрический ток в полном соответствии уравнению (1).

Теперь учтем, что значение химических потенциалов электронов и дырок  $\mu_n$  и  $\mu_p$  зависят от температур  $T_n$  и  $T_p$ , для термо эдс при разогреве носителей получим:

$$\varepsilon = \frac{1}{e_p} \oint \frac{\sigma_n}{\sigma} \frac{d}{dx} (\delta\xi_p + \delta\xi_n) dx = \frac{1}{e_n} \oint \frac{\sigma_p}{\sigma} \frac{d}{dx} (\delta\xi_p + \delta\xi_n) dx \quad (6)$$

где  $\delta\xi = \xi_k - \xi_{k0}$ ,  $\xi_k = \xi_k(T_k, n_k) = T_k \ln \left( \frac{n_k}{N_k(T_k)} \right)$ ,  $\xi_{k0} = \xi_{k0}(T_0, n_{k0})$ ,  $n_{k0}$  и  $n_k$  – равновесная и неравновесная концентрация носителей заряда,  $N_k(T_k)$  – эффективная плотность состояний в соответствующей зоне. Учитывая, что полупроводник считается невырожденным, получим из (6) для эдс следующее выражение:

$$\varepsilon = -\frac{\theta_p}{e_p} \oint \frac{\sigma_n}{\sigma_n + \sigma_p} \left( \frac{dE_g}{dx} \left( 1 - \frac{\theta_n}{\theta_p} \right) \frac{d\xi_{ng}}{dx} \right) dx, \quad (7)$$

где  $\theta_k = (T_k - T_0)/T_0$ ,  $E_g$  – ширина запрещенной зоны полупроводника [12]. Из (7) следует, что в замкнутом контуре с неоднородным легированием и тем более с переменной шириной запрещенной зоны будет возникать эдс в условиях однородного нагрева всего контура.

### 3. Заключение

Таким образом, получено уравнение, которое описывает возникновение электродвижущей силы в варизонных полупроводниках при однородном нагреве их без градиента температуры вдоль образца. Полученное уравнение свидетельствует о том, что чем больше изменения ширины запрещенной зоны и уровня легирования вдоль образца, тем больше значение электродвижущей силы, возникающей при однородном нагреве.

Работа выполнена при финансовой поддержке внутреннего гранта ФА-Ф2-003 Республики Узбекистан: «Фото-, термоэлектрические и излучательные эффекты в новых многокомпонентных твердых растворах с нанокристаллами на основе молекул элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений».

#### Список литературы

1. Saidov A.S., Abakumov A.A., Saidov M.S., Usmonov Sh.N., and Kholikov K.T., 2007. Applied Solar Energy. **43**, 4, 266.
2. Саидов А.С., 2008. Термоэлектрические свойства технического кремния, переплавленного на солнечной печи. Гелиотехника. 3, 57-58.
3. Саидов А.С., Лейдерман А.Ю., Маншуров Ш.Т., 2011. Природа термо voltaических токов и напряжений, наблюдаемых при исследовании поликристаллического кремния полученного пятикратной переплавкой технического кремния на солнечной печи. Гелиотехника. 2, 7-9.
4. Saidov A.S., Leiderman A.Yu., Suleimanov Kh.M., and Ayukhanov R.A., 2012. Applied Solar Energy. **48**, 2, 76.
5. Каминский В.В., Соловьев С.М., 2001. ФТТ. **43**, 3, 423-426.
6. Каминский В.В., Казанин М.М., 2008. Письма в ЖТФ. **34**, 8, 92-94.
7. Каминский В.В., Дидик В.А., Казанин М.М., Романова М.В., Соловьёв С.М., 2009. Письма в ЖТФ. **35**, 21, 16.
8. Пронин И.А., Аверин И.А., Божинова А.С. и др., 2015. Письма в ЖТФ, **41**, 19, 23.
9. Саидов М.С., Саидов А.С., Усмонов Ш.Н., Амонов К.А., 2009. Термо voltaический эффект pSi-n(Si<sub>2</sub>)<sub>1-x</sub>(ZnS)<sub>x</sub> структур. Гелиотехника. 4, 102-104.
10. Саидов А.С., Усмонов Ш.Н., Асатова У.П., 2010. Термоэлектрические свойства nGe-p(InSb)<sub>1-x</sub>(Sn<sub>2</sub>)<sub>x</sub> гетероструктур. Гелиотехника. 2, 25-28.
11. Саидов А.С., Лейдерман А.Ю., Каршиев А.Б., 2016. Письма в ЖТФ. **42**, 14, 21.
12. Щука А.А., 2007. Нанозлектроника. М.: Физматкнига.