

5-28-2021

FEW INFORMATION OF ARTICLE ON THE FLEXOPHOTOVOLTAIC EFFECT IN SEMICONDUCTOR P-N-STRUCTURES

R Aliev

Andijan State University, alievuz@yahoo.com

F Behrad

Berlin Technical University, Germany

J Gulomov

Berlin Technical University, Germany

M Abduvokhidov

Andijan State University

S Aliev

Andijan State University

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://uzjournals.edu.uz/ferpi>

Recommended Citation

Aliev, R; Behrad, F; Gulomov, J; Abduvokhidov, M; Aliev, S; and Rashidov, B (2021) "FEW INFORMATION OF ARTICLE ON THE FLEXOPHOTOVOLTAIC EFFECT IN SEMICONDUCTOR P-N-STRUCTURES," *Scientific-technical journal*: Vol. 4 : Iss. 1 , Article 8.

Available at: <https://uzjournals.edu.uz/ferpi/vol4/iss1/8>

This Article is brought to you for free and open access by 2030 Uzbekistan Research Online. It has been accepted for inclusion in Scientific-technical journal by an authorized editor of 2030 Uzbekistan Research Online. For more information, please contact sh.erkinov@edu.uz.

FEW INFORMATION OF ARTICLE ON THE FLEXOPHOTOVOLTAIC EFFECT IN SEMICONDUCTOR P-N-STRUCTURES

Authors

R Aliev, F Behrad, J Gulomov, M Abduvokhidov, S Aliev, and B Rashidov

FUNDAMENTAL SCIENCES

УДК 621.315

FEW INFORMATION OF ARTICLE ON THE FLEXOPHOTOVOLTAIC EFFECT IN SEMICONDUCTOR P-N-STRUCTURES

¹Aliev R., ²Behrad F., ²Gulomov J., ¹Abdovokhidov M., ¹Aliev S., ¹Rashidov B.¹Andijan State University, e-mail: alievuz@yahoo.com,²Berlin Technical University, GermanyО ФЛЕКСОФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОМ ЭФФЕКТЕ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ *p-n*-СТРУКТУРАХ¹Алиев Р., ²Бехрендт Ф., ¹Гуломов Ж., ¹Абдувохидов М., ¹Алиев С., ¹Рашидов Б.¹Андижанский государственный университет, e-mail: alievuz@yahoo.com,²Берлинский технический университет, ГерманияЯРИМЎТКАЗГИЧЛИ *P-n*-СТРУКТУРАЛАРДА ФЛЕКСОФОТОВОЛЬТАИК ЭФФЕКТ ТЎҒРИСИДА¹Алиев Р., ²Бехрендт Ф., ¹Гуломов Ж., ¹Абдувохидов М., ¹Алиев С., ¹Рашидов Б.¹Андижон давлат университети, e-mail: alievuz@yahoo.com,²Берлин техника университети, Германия

Abstract: In this work, the experimentally discovered effect of flexophotovoltaics (FFV) in silicon *p-n* structures under the influence of local mechanical stress on the front surface is theoretically justified for the first time. The regularities of the manifestation of the FFV effect are determined depending on the value of the local pressure force and the photoexcitation intensity. The experimental data were processed statistically by the least squares method and a new empirical formula was obtained for the experimentally determined dependence of the short-circuit photocurrent of a silicon structure on local mechanical stress.

Key words: Silicon, *p-n* junction, flexophotovoltaics, deformation, mechanical stress, crystal, band gap.

Аннотация: В данной работе теоретически обоснован впервые экспериментально обнаруженный эффект флексофотовольтаики (ФФВ) в кремниевых *p-n*-структурах при влиянии локального механического напряжения на фронтальной поверхности. Определены закономерности проявления эффекта ФФВ в зависимости от величины локальной силы давления и интенсивности фото возбуждения. Выполнена статистическая обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов и получена новая эмпирическая формула для экспериментально определенной зависимости фототока короткого замыкания кремниевой структуры от локального механического напряжения.

Ключевые слова: Кремний, *p-n*-переход, флексофотовольтаика, деформация, механическое напряжение, кристалл, ширина запрещенной зоны.

Аннотация: Ушбу ишда биринчи марта кремнийли *p-n*-структурада унинг фронтал сиртига локал механик зўриқиши берилганда экспериментал кузатилган флексофотовольтаик эффект назарий асосланган. Флексофотовольтаик эффектнинг намоён бўлишининг сиртга берилган локал босим кучига ва фотоқўзғатиши интенсивлигига боғлиқлик қонуниятлари аниқланган. Экспериментал олинган натижаларни энг кичик квадратлар усули ёрдамида статистик қайта ишлаб, кремнийли структурада қисқа туташув фототокининг локал механик зўриқишига боғлиқлиги учун янги эмпирик формула олинган.

FUNDAMENTAL SCIENCES

Таянч сўзлар: Кремний, p-n-ўтиши, флексофотовольтаика, деформация, механик зўриқиши, кристалл, тақиқланган зона кенглиги.

ВВЕДЕНИЕ

Авторами работы [1] предложен новый способ повышения эффективности фотоэлектрического преобразования (ФП) за счет локального давления полупроводниковых кристаллов при их освещении оптическим светом определенной длины волны. Оказание локального давления кристаллу приводит к возникновению в нем градиента механического напряжения и, следовательно, наблюдается флексофотовольтаический (ФФВ) эффект. Исходя из кристаллографического представления полупроводниковых материалов можно предполагать, что ФФВ эффект может наблюдаться в любых видах полупроводников, в т. ч. и в кремний. Однако, физическая природа ФФВ практически не изучена. С целью рекомендации эффекта ФФВ для повышения эффективности какого-либо электронного прибора, в частности ФП, мы должны представит процесс переноса заряда в рассмотренной структуре. С другой стороны, по физике известных полупроводниковых приборов знаем, что если формировать *p-n*-переход в объеме полупроводника, то чувствительность на внешние воздействия такой (диодной) структуры на много повышается по сравнению со структурой без *p-n*-перехода (резистора) [2]. Поэтому, представляет важный физический и практический интерес - целенаправленное исследование локального механического напряжения на процесс фотоэлектрического преобразования в кремниевых структурах с *p-n*-переходом к чему посвящена настоящая работа.

В полупроводнике *n*-типа проводимости при приложении электрического поля с напряженностью E , основные носители заряда (НЗ) – электроны с зарядом q и подвижностью μ_e получают упорядоченное движение со скоростью v_e . Для такого электрического тока и других основных физических параметров можно принять следующие известные выражения:

$$I = -qn_e v_e S; \quad v_e = \mu_e E; \quad E = -grad(\varphi), \quad (1)$$

где φ – высота потенциального барьера *p-n*-перехода и S – площадь ФП.

В случае рассмотрения потока электронов только в одном направлении с длиной l и напряженностью $E = -\Delta U/l$ можно получить выражение для тока [3]:

$$I = -qn_e v_e S (\Delta U/l) \quad (2)$$

Согласно теории ФП с *p-n*-переходом ток определяется выражением:

$$I = I_0 [e^{(U_e/kT)} - 1] \quad (3)$$

Учитывая выражение (2) и то, что темновой ток I_0 определяется суммой диффузионного тока электронов и дырок через *p-n*-переход получаем:

$$I = S q n_i^2 [(D_p/L_p N_d) + (D_n/L_n N_a)] \times [e^{(U_e/kT)} - 1], \quad (4)$$

где n_i - концентрация электронов в собственном полупроводнике, D_p - коэффициент диффузии дырок, L_p - длина диффузии дырок, N_d - концентрация доноров в эмиттере, D_n - коэффициент диффузии электронов, L_n - длина диффузии электронов, N_a - концентрация акцепторов в базе, U - высота барьера, k - коэффициент Больцмана, T - абсолютная температура.

В более обобщенном виде можно представить, что

$$I = (\beta/L) f(U), \quad (5)$$

где определенный вид для коэффициента β можно выбрать из выражений (2) или (4).

Принятие представления позволяют считать, что если ВАХ полупроводникового ФП подчиняется выражению (5), то для любого диода без смещения выполняется условие: $U \rightarrow 0$ и $f(U) \rightarrow 0$; для освещенного ФП: $U \rightarrow 0$ и $f(U) \rightarrow I$.

Теперь рассмотрим кристаллическую решетку полупроводникового кремния. Для силы притяжения между соседними атомами можно выбрать известное выражение [4]:

$$F = Akq^2/r^2, \quad (6)$$

FUNDAMENTAL SCIENCES

где A – коэффициент пропорциональности, зависящий от вида межатомной связи, r – межатомное расстояние.

Если поставленная внешняя сила F_k вызывает изменение межатомного расстояния и принимать условия:

$$r \sim L, r = \gamma L, dr = \gamma dL, \tag{7}$$

где γ – коэффициент пропорциональности.

то можно представить, что внешняя сила вызывает изменение исходной силы межатомного притяжения $(F + \Delta F)$ за счет изменения межатомного расстояния $(r + \Delta r)$:

$$F + \Delta F = Akq^2 / (r + \Delta r)^2 \tag{8}$$

Из этого можно получить:

$$\Delta F = Akq^2 [\Delta r(2r - \Delta r) / (r - \Delta r)^2 r^2] \tag{9}$$

Теперь попытаемся оценить каким образом влияет небольшое изменение силы притяжения F на изменение межатомного расстояния r . Выполним некоторые математические преобразования:

$$\begin{aligned} \Delta F / \Delta r &= Akq^2 [(2r - \Delta r) / (r - \Delta r)^2 r^2] \\ dF / dr &= \lim_{\Delta r \rightarrow 0} (\Delta F / \Delta r) = - Akq^2 (2/r^3) \end{aligned}$$

и получаем:

$$dF = - Akq^2 (2/r^3) dr \tag{10}$$

Учитывая (7) можем получить:

$$dL = - (\gamma^2 L^3 / 2 Akq^2) dF. \tag{11}$$

Теперь с целью определения зависимости тока от диффузионной длины L_3 дифференцируем (5):

$$dI = - (\beta \gamma^2 L / 2 Akq^2) f(U) dF, \tag{12}$$

Отсюда находим:

$$L = (Akq^2)^{1/2} / \gamma F f(U), \tag{13}$$

$$dI = [\beta \gamma / 2 (Akq^2)^{1/2}] f(U) dF / F^{1/2}, \tag{14}$$

Для тока к. з. ФП можно получить выражение:

$$dI_{к.з.} = [\beta \gamma / 2 (Akq^2)^{1/2}] dF / F^{1/2}, \tag{15}$$

Проинтегрировав (15) и учитывая $F = F_k + F_0$ получаем:

$$I_{к.з.} = I_{к.з.0} + [\beta \gamma / (Akq^2)^{1/2}] \times [(F_k + F_0)^{1/2} - F_0^{1/2}], \tag{16}$$

где F_0 – межатомная сила притяжения без приложения внешней силы.

Выполнено экспериментальное исследование при помощи специального устройство (блок 3, Рис. 1), которое посредством вертикальной иглы с острым концом ≈ 50 мкм, закрепленный на одном конце эластичного тонкого стержня позволяло осуществить локальное давление на фронтальную поверхность (n -типа) кремниевое ФП 1 с диффузионным p - n -переходом с глубиной залегания 0,5 мкм. Толщина кремниевой базы p -типа проводимости составляла ≈ 170 мкм.

Величина механического давления в блоке 3 варьировалась в диапазоне от нуля до 1 Н с увеличением силы тяжести груза. Воздействию механического давления на исследуемую структуру оценивалось путем измерения ВАХ освещенного при помощи системы 4 ФП при помощи лабораторного измерительного комплекса 2 с цифровым табло показаний измеренных фотоэлектрических параметров.

Полученные экспериментальные результаты представлены на рис. 2 в виде (кривая 2) зависимости $I_{к.з.} = f(F_k)$. Как видно из графика (Рис.

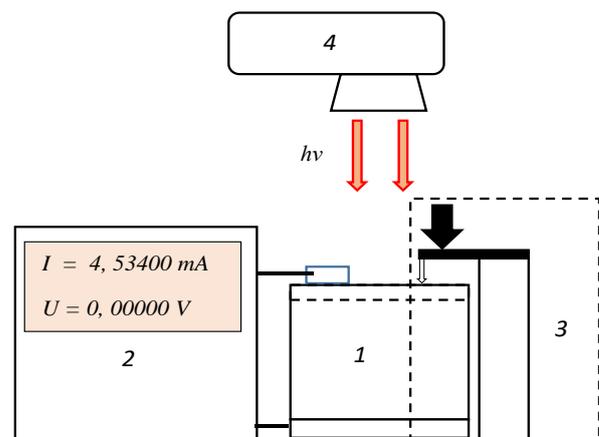


Рис. 1. Блок схема экспериментального устройства для измерения зависимости фототока к. з. кремниевой p - n -структуры от величины локального механического напряжения на фронтальной поверхности.

FUNDAMENTAL SCIENCES

2), с увеличением величины внешней силы, оказывающее локальное давление на поверхность кремния, существенно возрастает значение фототока к. з. Выбор верхнего предела увеличения внешней силы связан с тем, что более высокие значения превышает критического значения механической прочности пластины кремния и вызывает выход из строя структуры.

Проведенные дополнительные эксперименты свидетельствовали о существенной роли дислокации точки локального воздействия относительно фронтальным электродным полосам. Причем, четко проявлено более сильное изменение значений фототока к. з. при более близких к контакту точках, чем дальние. Также установлено что увеличение значений фототока к. з. при более высоких уровнях освещенности становится более существенным, чем при слабых освещенностях (Рис. 3).

По данным рис. 3 можно отметить, что зависимость фототока к. з. кремниевой p-n-структуры от относительного роста освещенности при различных значениях локального механического напряжения на фронтальной поверхности имеет существенное повышение прироста фототока к. з. с увеличением силы механического давления в диапазоне освещенности от нуля до 0,8 кратного солнечного излучения. С увеличением силы давления на локальную точку от нуля до 1 Н наблюдается постепенный прирост фототока за счет флексофотовольтаического эффекта. Причем, прирост фототока к. з. более значительно в диапазоне силы давления 0-0,5 Н, при более 0,5 Н прирост ослабевает. На исследованных образцах верхний предел силы тяжести составлял не более 1 Н. Превышение этого предела сопровождался выходом из строя структуры, что связано превышением механической прочности пластины исследованной толщины.

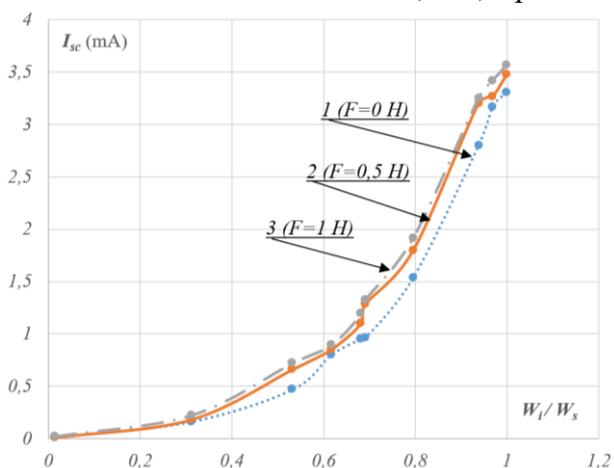


Рис. 3. Зависимость фототока к. з. кремниевой p-n-структуры от относительного роста освещенности при различных значениях локального механического напряжения на фронтальной поверхности.

представляет практический интерес для анализа экспериментальных зависимостей фототока к. з. полупроводникового ФП от величины приложенной внешней силы.

Для экспериментальной графической $I_{к.з.} = f(F_k)$ зависимости (Рис. 1) соответствовало выражение (17). Статистическая обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов позволяла определить значения коэффициента пропорциональности выражения (17): $\alpha = 0,8114$.

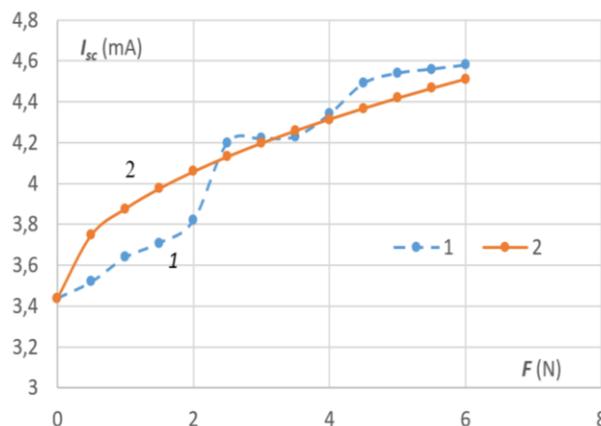


Рис. 2. Зависимость фототока к. з. кремниевой p-n-структуры от величины локального механического напряжения на фронтальной поверхности: 1 - эксперимент, 2 – расчет.

На исследованных образцах верхний предел силы тяжести составлял не более 1 Н. Превышение этого предела сопровождался выходом из строя структуры, что связано превышением механической прочности пластины исследованной толщины.

Основываясь на ничтожности значений F_0 (в порядке 10^{-9} Н), можно принимать, что $F_k \gg F_0$. Следовательно, учитывая $\beta\gamma/(Akq^2)^{1/2} = \alpha$ выражение (16) можно упростить:

$$I_{к.з.} = I_{к.з.0} + \alpha F_k^{1/2}, \tag{17}$$

где фототок к. з. при отсутствии механического напряжения выражается в виде:

$$I_{к.з.0} = Sqn_i^2 [D_p/(L_p N_d) + D_n/(L_n N_a)].$$

Полученная упрощенная формула (17)

FUNDAMENTAL SCIENCES

Считаем, что представленные в работе [5] результаты об увеличении времени жизни, следовательно, диффузионной длины носителей заряда в кремниевых пластинах после механической обработки ультразвуковой частоты могут подтвердить гипотезу теоретического механизма исследованного флексофотовольтаического эффекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Считаем целесообразным доработать и внедрить в производство способ повышения эффективности преобразования кремниевых ФП $p-n$ -переходом. Для этого требуется разработка новых конструкций ФП, позволяющих локально деформировать их фронтальную поверхность. Кажется, что при уменьшении за последующие несколько лет толщины базы кремниевых ФП может наблюдаться более высокая фотоэлектрическая чувствительность к локальной деформации.

Можно также отметить, что представленные результаты могут служить основанием для создания датчиков механического давления или чувствительных к механическим воздействиям фотоприемников на основе достаточно широко распространенного кристаллического кремния.

В заключении отметим, что выполнено теоретическое обоснование впервые обнаруженного авторами эффекта флексофотовольтаики в кремниевых $p-n$ -структурах. Установлены закономерности проявления эффекта флексофотовольтаики в зависимости от локального механического напряжения, получена новая эмпирическая формула для экспериментально определенной зависимости фототока короткого замыкания кремниевой структуры от локального механического напряжения.

Установлена преимущественная корреляция теоретически предложенной закономерности и экспериментальных данных.

Результаты исследования служат также для разработки новых видов флексофотовольтаических фотоприемников.

Исследование выполнено в рамках инновационного проекта АИФ-2/7, финансируемого всемирным банком.

References

- [1]. M.-M. Yang et al. // Science, 2018. Mark Garlick. Физики выдавили из солнечных батарей дополнительную энергию. // University of Warwick. // http://www.nanonewsnet.ru/news/2018/fiziki-vydavili-iz-solnechnykh-batarei-dopolnitelnuyu-nerguyu?utm_campaign=subscribe techno&utm_medium=email&utm_source=subscribe (Опубликовано 20 апреля, 2018).
- [2]. С.Зи, Физика полупроводниковых приборов. Книга 1 - М.: Мир, 1984. - 456 с.
- [3]. Jeffery L. Gray "The physics of the solar cell", Purdue university, West Lafayette, Indiana, USA.
- [4]. Kim, Jiseok, "Band Structure Calculations of Strained Semiconductors Using Empirical Pseudopotential Theory" (2011). *Open Access Dissertations*. 342.
- [5]. Р.Алиев, Б.Урманов, М.Муйдинова, Ж.Каххаров Стимулирование времени жизни носителей заряда за счет флексо-электрического эффекта на поверхности кремния. // Материалы IV Международной конференции по «Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро - и наноструктурах» ФерПИ, 26-27 мая 2018, Фергана. С. 277-279.