

ФОТОЭЛЕКТРЕТНОЕ СОСТОЯНИЕ БЕЗ ВНЕШНЕГО ПОЛЯРИЗУЮЩЕГО ПОЛЯ В ОДНОРОДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

З.И.Мирзаева, Г.А.Набиев, К.М.Эргашов

Ферганский политехнический институт

Узбекистан

Поступила в редакцию 03.06.2008

В работе показана возможность и разработана теория фотоэлектретного состояния в однородных полупроводниках. Фотоэлектретное состояние возникает в отсутствие внешнего поляризующего поля в результате одного лишь освещения.

Для многослойной структуры с однородными микрообластями, являющимися фотоактивными, найдено выражение для фотонапряжения с учетом глубоких уровней прилипания для неосновных носителей заряда.

Когда время жизни свободных неосновных носителей намного меньше времени жизни носителей на уровне прилипания в структуре, наблюдается фотоэлектретное состояние.

В простейшем случае фотонапряжение релаксирует по экспоненциальному закону. Время релаксации исчисляется несколькими часами.

Наиболее перспективным материалом для наблюдения фотоэлектретного состояния без внешнего поляризующего поля является кремний.

Структуры, в которых наблюдается этот эффект, могут быть применены как элементы памяти и в электрофотографии.

ВВЕДЕНИЕ

Исследованию фотоэлектретного эффекта, наблюдаемого при освещении полупроводников во внешних электрических полях, посвящено достаточно много работ [1]. В работе [2] была показана возможность образования фотоэлектрета нового типа, формирующегося без внешнего поляризующего поля. Показано, что такие фотоэлектретные состояния, создаваемые непосредственно освещением, могут быть реализованы в полупроводниках с p - n -переходами.

Экспериментально фотоэлектретный эффект без внешнего поляризующего поля наблюдался в пленках ряда полупроводников ($\text{Na}_2\text{S}:\text{Sb}_2\text{S}_3$ [3], $\text{CdTe}:\text{Ag}$ [4, 5], $\text{CdTe}:\text{Cu}$ [6]), для которых принята p - n -переходная модель.

Фотоэлектретный эффект изучался и в пленках кремния [5, 7], фотонапряжение в которых генерируется за счет дембер-эффекта. Но теория фотоэлектретного состояния в однородных полупроводниках с демберовским механизмом фотонапряжения не создана.

В данной работе показана возможность и создана теория фотоэлектретного состояния в однородных полупроводниках с демберов-

ским механизмом генерации фотонапряжения. Фотоэлектрет такого типа может быть создан, в отличие от традиционных, и как в [2], без внешнего поля, в результате одного лишь освещения. Поляризующим фактором, в данном случае, является различие подвижностей электронов и дырок.

МОДЕЛЬ И ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Рассматривается многослойная структура, генерирующая anomalно-большие фотонапряжения (АФН-эффект) [8–10] с однородными фотоактивными микрообластями, разделенными препятствующими выравниванию концентрации носителей, прослойками (рис. 1).

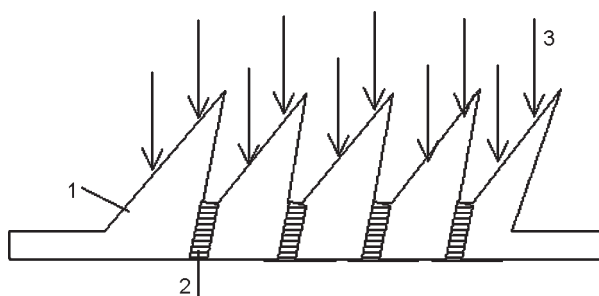


Рис. 1. Демберовская модель АФН-пленки: 1 – фотоактивная область; 2 – высокоомная прослойка; 3 – свет.

Считаем, что однородные фотоактивные области содержат глубокие уровни прилипания (рис. 2).

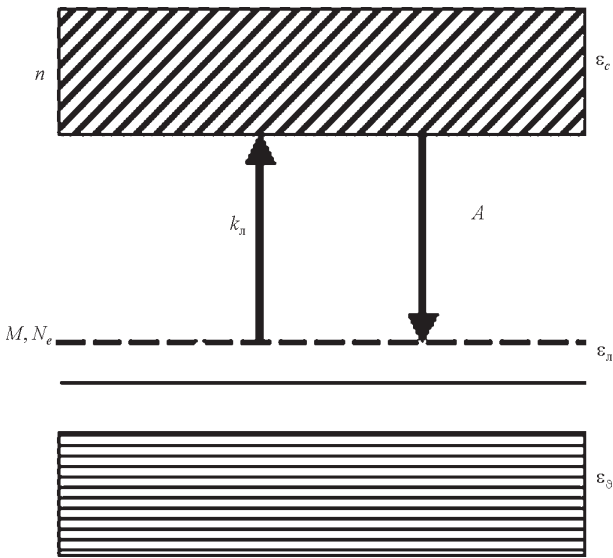


Рис. 2. Схема переходов в демберовском микрофотоэлементе.

Фотоэлектретное состояние в однородных микрофотоэлементах на основе эффекта Дембера наблюдается при неоднородной биполярной генерации электронно-дырочных пар, последующего их разделения за счет различия подвижностей электронов и дырок и прилипания неравновесных носителей заряда на глубокие уровни. Суммирование фотоэлектретных напряжений в многослойной структуре приводит к их существенным значениям.

В демберовской модели АФН-пленки освещается одна сторона элементов; другая сторона затемнена из-за их дендритной структуры поверхности – этим создаются условия для неоднородного освещения.

Анализ показывает, что в этом случае можно воспользоваться кинетическими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{1}{q} \frac{\partial j_n}{\partial x} + \frac{n - n_0}{\tau} &= k_n N_e - An(M - N_e), \\ \frac{\partial N_e}{\partial t} &= An(M - N_e) - k_n N_e \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

и выражением для плотности тока

$$j_n = qD_n \frac{\partial n}{\partial x}. \quad (2)$$

Демберовское напряжение находим, интегрируя напряженность поля Дембера по толщине одного элемента (рис. 3)

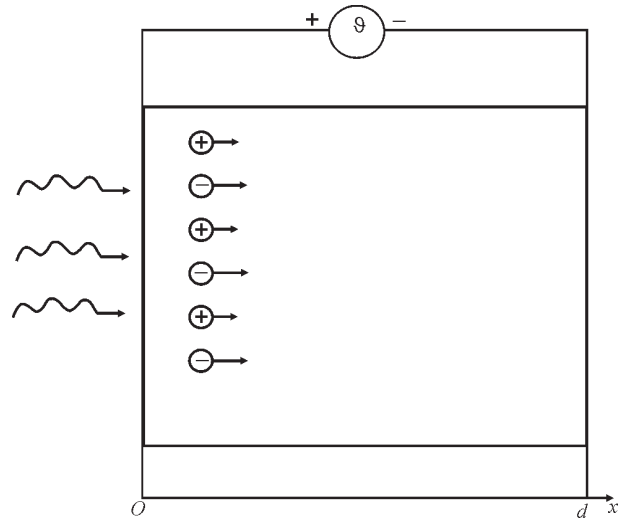


Рис. 3. Схема расчета демберовского фотонапряжения в однородном полупроводнике.

$$\vartheta = \frac{kT}{q} \frac{b-1}{b+1} \ln \frac{(b+1)(n-n_0)_{x=0} + bn_0 + p_0}{(b+1)(n-n_0)_{x=d} + bn_0 + p_0}, \quad (3)$$

где $(n - n_0)_{x=0} = \Delta n_{x=0}$ и $(n - n_0)_{x=d} = \Delta n_{x=d}$ концентрации неравновесных носителей в $x = 0$ и $x = d$, соответственно.

В случае сильного поверхностного поглощения и поверхностной генерации, когда наиболее ярко выражен дембер-эффект $\Delta n_{x=d} = 0$, $\Delta n = \Delta n_{x=0}$ и при $n_0 = p_0$ из (3) получим

$$\vartheta = \frac{kT}{q} \frac{b-1}{b+1} \ln \left(1 + \frac{\Delta n}{n_0} \right). \quad (4)$$

Если считать, что на каждом демберовском элементе $\vartheta < \frac{kT}{q} \frac{b-1}{b+1}$, то задача линейризуется и уравнения (1), (2) могут быть записаны в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Delta n}{\partial t} - D_n \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2} + \Delta n \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_2} \right) &= \frac{\Delta N_e}{\tau_1} \\ \frac{\partial \Delta N_e}{\partial t} + \frac{\Delta N_e}{\tau_1} &= \frac{\Delta n}{\tau_2} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

$$j_n = qD_n \frac{\partial \Delta n}{\partial x}, \quad (6)$$

где $\tau_1 = \frac{1}{k_n + An_0}$; $\tau_2 = \frac{1}{A(M - N_e)}$ (7)

(4) принимает вид

$$\vartheta = \frac{kT}{q} \frac{b-1}{b+1} \frac{\Delta n}{n_0}. \quad (8)$$

Как показано в [2],

$$D_n \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2} = \frac{\Delta n}{\theta}, \quad (9)$$

где
$$\theta \approx \frac{W^2}{D_n^2}. \quad (10)$$

Вводим характеристическое время [2]

$$\frac{1}{\tau_3} = \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\theta} + \frac{1}{\tau_2} \quad (11)$$

и записываем систему (5) в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Delta n}{\partial t} + \frac{\Delta n}{\tau_3} &= \frac{\Delta N_e}{\tau_1} \\ \frac{\partial \Delta N_e}{\partial t} + \frac{\Delta N_e}{\tau_1} &= \frac{\Delta n}{\tau_2} \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Граничные условия имеют вид

$$\vartheta_0 = \frac{kT}{qn_0} \frac{b-1}{b+1} \Delta n \Big|_{t=0} = \frac{kT}{qn_0} \frac{b-1}{b+1} \Delta n_0; \quad (13)$$

$$\vartheta_0 = \frac{kT}{qn_0} \frac{b-1}{b+1} \frac{\tau_2}{\tau_1} \Delta N_e \Big|_{t=0} = \frac{kT}{qn_0} \frac{b-1}{b+1} \frac{\tau_2}{\tau_1} \Delta N_{e0}. \quad (14)$$

Для фотонапряжения батарей, последовательно соединенных, состоящих из N одинаковых, однородных микрофотоэлементов

$$V = N\vartheta = N \frac{kT}{q} \frac{b-1}{b+1} \frac{\Delta n}{n_0}, \quad (15)$$

получаем закон затухания в виде

$$V = N \frac{kT}{qn_0} \frac{b-1}{b+1} \Delta n_0 \left(\frac{1}{\tau^2} - \frac{4}{\tau_1 \tau'} \right)^{-1/2} \times \left[\left(\frac{4}{\tau'} + S_2 \right) \exp(S_1 t) - \left(\frac{4}{\tau'} + S_1 \right) \exp(S_2 t) \right] \quad (16)$$

и в данном случае обозначения такие же, как и в [2]

$$\frac{1}{\tau'} = \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\theta}, \quad \frac{1}{\bar{\tau}} = \frac{1}{\tau'} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_1}; \quad (17)$$

$$S_{1,2} = -\frac{1}{2\bar{\tau}} \mp \sqrt{\frac{1}{4\bar{\tau}^2} - \frac{1}{\tau_1 \tau'}}, \quad (18)$$

где τ_3 – полное время жизни электрона, определяемое рекомбинацией, прилипанием и уходом из данной области; τ' – парциальное время жизни свободного электрона, определяемое рекомбинацией и уходом из данной области; τ_1 – эффективное время жизни электрона на локальном уровне [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИЯ

Необходимое и достаточное для наблюдения фотоэлектрического состояния [11] условие квазистационарности [12] приводит и в случае однородного демберовского элемента к выражению

$$\tau' \ll \tau_1, \quad (19)$$

что дает возможность записать закон затухания в более упрощенном виде:

$$V = N \frac{kT}{qn_0} \frac{b-1}{b+1} \Delta n_0 \left\{ \frac{\tau_2}{\tau_2 + \tau} \exp(-t/\tau_3) + \frac{\tau'}{\tau_2 + \tau} \exp[-\tau_2 t / \tau_1 (\tau_2 + \tau_1)] \right\}. \quad (20)$$

Согласно [11], условие (19) выполняется тогда, когда концентрация неосновных носителей на уровнях прилипания (N_e) намного больше концентрации свободных носителей заряда (n) в зоне проводимости

$$N_e \gg n. \quad (21)$$

С течением времени N_e уменьшается, но для того, чтобы (21) оставалось справедливым, уровень прилипания должен пополняться носителями заряда (электронами). Это осуществимо тогда, когда

$$\tau' \gg \tau_2, \quad (22)$$

где τ_2 – время захвата на уровень прилипания.

В общем случае, время, затрачиваемое на любой процесс, приводящий к увеличению концентрации электронов на уровне прилипания, должно быть намного меньше времени любого процесса, приводящего к рекомбинации.

В случае, когда квазиравновесие между зоной проводимости и уровнями прилипания устанавливается за время (τ_2), намного меньшее, чем эффективное время жизни свободного электрона (τ'):

$$V = N \frac{kT}{qn_0} \frac{b-1}{b+1} \Delta n_0 \times$$

$$\times \left[\left(1 - \frac{\tau_2}{\tau'} \right) \exp(-\tau_2 t / \tau_1 \tau') + \frac{\tau_2}{\tau'} \exp(-t/\tau_2) \right]. \quad (23)$$

Релаксация фотонапряжения происходит, в основном, по закону

$$V = N \frac{kT}{qn_0} \frac{b-1}{b+1} \Delta n_0 \exp(-\tau_2 t / \tau_1 \tau'). \quad (24)$$

Обозначив фотонапряжение при $t = 0$ как

$$V_0 = N \frac{kT}{qn_0} \frac{b-1}{b+1} \Delta n_0 \quad (25)$$

и характеристическое время затухания фото-

напряжения $\tau^* = \tau_1 \frac{\tau'}{\tau_2}$, (26)

получим для закона релаксации фотонапряжения

$$V = V_0 \exp(-t/\tau^*). \quad (27)$$

Экспериментальным критерием выполнения условия квазистационарности

$$\tau_1 \gg \tau' \gg \tau_2 \quad (28)$$

является независимость $\lg(Jt)$ от $\lg J$ или от $\lg t$ (где J – интенсивность света, t – время) (рис. 4) [11].

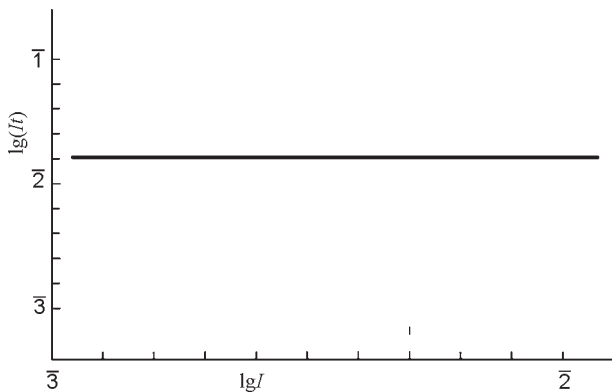


Рис. 4. Изоопака фотоэлектретного состояния.

Выражение (23) было получено при условии $\tau' \gg \tau_2$, тогда, $\tau^* \gg \tau_1$, т.е. характеристическое время релаксации, не только $\tau^* \gg \tau'$, но и намного больше времени жизни электрона на уровне прилипания τ_1 .

Проведенный анализ показывает, что для однородного демберовского микрофотоэлемента в этом случае

$$\tau_1/\tau_2 = (M/N_c) \exp(\epsilon_c - \epsilon_n)/kT. \quad (29)$$

Для возникновения фотоэлектретного состояния должно быть $\tau_1 \gg \tau_2$, т.е. время жизни на уровне прилипания должно быть намного больше времени захвата на уровень прилипания.

Генерированные теплом с локальных уровней носители заряда выступают как неравновесные; они поддерживают почти постоянную концентрацию носителей и релаксация фотонапряжения затягивается на большие времена τ^* (рис. 5).

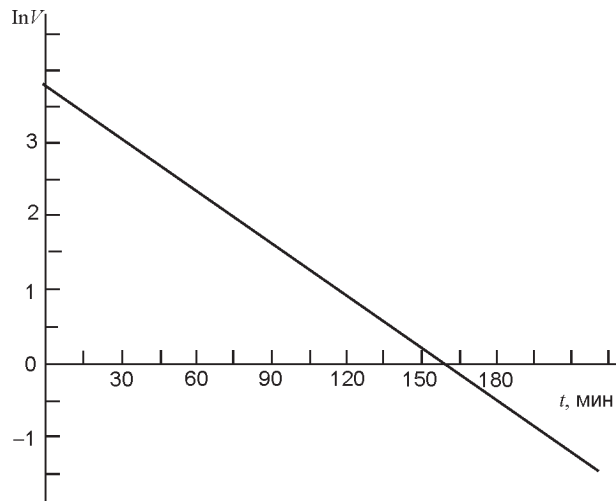


Рис. 5. Релаксация фотоэлектретного напряжения при $\tau^* = 40$ мин.

ВЫВОДЫ

Таким образом, показано, что в однородных полупроводниках с демберовским механизмом генерации фотонапряжения возможно создание фотоэлектретного состояния без внешнего поляризующего поля.

Получено условие квазистационарности для фотоэлектретного состояния в полупроводниках.

Получен закон релаксации фотонапряжения в однородных полупроводниках с глубокими уровнями. В простейшем случае фотоэлектретное напряжение релаксирует по экспоненциальному закону.

Экспериментально обнаруженное фотоэлектретное состояние в пленках Si:Ag [13], для которых принята демберовская модель, хорошо описывается вышеприведенной теорией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковальский П.Н., Шнейдер А.Д. Фотоэлектретный эффект в полупроводниках. – Львов: Виша школа, 1977. – 150 с.
2. Адирович Э.И. Фотоэлектретное состояние в полупроводниках с *p-n*-переходами//ФТП.– 1970. – Т. 4, Вып. 4. – С. 745-753.
3. Базакуца В.А, Кулибаба В.Д. Фотоэлектреты нового типа на основе АФН-слоев $\text{Na}_2\text{S} \cdot \text{Sb}_2\text{S}_3$ //ФТП. – 1975. – Т. 9, Вып. 7. – С. 1432-1434
4. Эргашев Д.Э. Фотополяризация в АФН-пленках теллурида кадмия (CdTe:Ag) с микро-*p-n*-переходами//ФТП.– 1978.– Т.12, Вып. 1.– С. 171-174.

5. Набиев Г.А. Фотоэлектретный эффект без внешнего поляризующего поля в полупроводниковых пленках//Фотоэлектроника и приборы ночного видения: Тез. докл. межд. конф. ГНЦ РФ ФГУП НПО "Орион". (Москва). – 2004. – С. 160-161.
6. Набиев Г.А. Фотоэлектретный эффект без внешнего поляризующего поля в пленках CdTe:Cu//Научно-технический журнал ФерПИ. – 2001. – №1. – С. 83-84.
7. Абдуллаев Н. Фотоэлектретное состояние без внешнего поляризующего поля в АФН-пленках Si//Изв. вузов.– 1988. – № 4. – С. 107-108.
8. Starkiewich I., Sosnowski L., Simpson O. Occurrence of condom photovoltaic barriers in photoconductive layers//Nature. – 1946. – Vol. 26. – P. 158.
9. Адирович Э.И. и др Аномально большие фотоэлектрический и фотомангнитный эффекты в полупроводниковых пленках//В кн. Фотоэлектрические явления в полупроводниках и оптоэлектроника. Фан, Ташкент. – 1972. – С. 143-229.
10. Агарев В.Н, Степанова Н.А. К теории эффекта аномального фотонапряжения в многослойных структурах с *p-n*-переходами//ФТП. – 2000. – Т. 34, № 4. – С. 452-455.
11. Фридкин В.М. Физические основы электрофотографического процесса. – М.: "Энергия", 1966. – 288 с.
12. Адирович Э.И. Некоторые вопросы теории люминесценции кристаллов. М.: ГТТИ, 1956. – 351с.
13. Набиев Г.А. Фотоэлектретное состояние без внешнего поляризующего поля в пленках Si:Ag//Письма в ЖТФ. – 2007. – Т. 33.– Вып. 20. – С. 1-4.

ФОТОЕЛЕКТРЕТНИЙ СТАН БЕЗ ЗОВНІШНЬОГО ПОЛЯРИЗУЮЧОГО ПОЛЯ В ОДНОРІДНИХ НАПІВПРОВІДНИКАХ

З.І. Мірзаєва, Г.А. Набієв, К.М. Ергашов

У роботі показані можливість і розроблена теорія фотоелектретного стану в однорідних напівпровідниках. Фотоелектретний стан виникає під час відсутності зовнішнього поляризуючого поля в результаті одного лише висвітлення.

Для багаточарової структури з однорідними мікрообластями, що є фотоактивними, знайдий вираз для фотонапруги з урахуванням глибоких рівнів прилипання для неосновних носіїв заряду. Коли час життя вільних неосновних носіїв набагато менший часу життя носіїв на рівні прилипання, в структурі спостерігається фотоелектретний стан.

У найпростішому випадку фотонапруга релаксує за експоненціальному законом. Час релаксації обчислюється декількома годинниками.

Найбільш перспективним матеріалом для спостереження фотоелектретного стану без зовнішнього поляризуючого поля є кремній.

Структури, у яких спостерігається цей ефект, можуть бути застосовані як елементи пам'яті та в електрофотографії.

THE PHOTO-ELECTRET STATE WITHOUT EXTERNAL ELECTRIC FIELD IN HOMOGENEOUS SEMICONDUCTORS

**Z.I. Mirzayeva, G.A. Nabiev,
K.M. Ergashov**

In this work has been created the theory of the photoelectrets state in homogeneous semiconductors. The photo-electrets of such type can be created as the result of only the illumination without external electric field. In this case the polarizing factor is the difference of mobility electrons and holes.

For multilayered structure with homogeneous micro areas being photoactive, the expression for a photo voltage is found in view of deep levels sticking for the non-basic carriers of the charge.

The photo-electrets state is observed when the time of life of free non-basic carriers is much less than time of life of carriers at a level of sticking in structure. In the elementary case a photo voltage is relaxes on the exponential law.

The time relaxation is estimated by several hours. The most perspective material for supervision of the photo-electrets state without external polarizing field is the silicon.

Structures, in which this effect is observed can be applied as elements of memory and in electro photography.