

АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
НПО «ФИЗИКА-СОЛНЦЕ» им. С.А. АЗИМОВА
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. С.В. СТАРОДУБЦЕВА

На правах рукописи
УДК 621.315.592

ГУЛЯМОВ АБДУРАСУЛ ГАФУРОВИЧ

ДИНАМИКА ДЕФОРМАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ И
РЕАКТИВНЫЕ ФОТОТОКИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПЛЁНКАХ

01.04.10 – Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Ташкент – 2010

Работа выполнена в Физико-техническом институте им. С.В. Стародубцева Академии Наук Республики Узбекистан и в Наманганском инженерно-педагогическом институте Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор **Шамирзаев Сезгир Хабибуллаевич**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор

Лейдерман Ада Юльевна

доктор физико-математических наук, профессор
Зайнобиддинов Сирожиддин Зайнобиддинович

Ведущая организация: Национальный университет Узбекистана

Защита состоится "_____" _____ 2010 года в _____ часов на заседании Специализированного совета Д 015.08.01 при Физико-техническом институте НПО «Физика Солнце» по адресу: 100084, г.Ташкент, ул. Бодомзор йули, 2 б

Тел.: (8-371-)233-12-71

Тел.: (8-371-)235-42-91; E-mail: karimov@uzsci.net

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института, НПО «Физика-Солнце» АН РУз.

Автореферат разослан «__» 2010 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: г. Ташкент, ул. Бодомзор йули, 2 б, учёному секретарю Специализированного совета Д 015.08.01

Учёный секретарь
Специализированного совета,
д.ф-м.н., профессор Каримов А.В.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность работы. Среди различного рода внешних воздействий, испытываемых полупроводником, особую группу составляют воздействия, сводящиеся к изменению внешних условий, в которых находится рассматриваемый полупроводник. Под внешними условиями мы понимаем в широком смысле различные внешние поля. Возмущение электронной системы в полупроводниках легко осуществляется с помощью электромагнитного поля, при этом кристаллическая решётка может оставаться относительно не возмущённой. Таким способом

можно вывести систему из равновесия. В этих условиях полупроводник приобретает новые свойства, и в образце возникают электродвижущие силы. В неоднородных системах исследование физических механизмов возникновения эдс является важной задачей для понимания физических процессов и создания новых полупроводниковых приборов. Тензорезистивные свойства полупроводников при наложении переменных деформаций должны зависеть от релаксационных явлений в этих структурах. Исследование динамики деформационных процессов и их связь с тензосвойствами полупроводников позволяет получить большую информацию о физических процессах, происходящих в полупроводниках, и определить положения энергетических состояний. Изучение такой системы в общем случае должно определяться методами, применяемыми при описании колебательных процессов, а также методами круговых процессов термодинамики.

При исследовании деформационных эффектов в полупроводниках методы фазовых диаграмм и циклических процессов термодинамики не использовались. Влияние внешних факторов на динамику деформационных эффектов сильно проявляется на $R(\epsilon)$ портретах этих процессов. Одновременное изменение параметров решетки полупроводника может сильно влиять на $R(\epsilon)$ портреты процесса, это даёт возможность отыскать новые эффекты или обобщить существующие.

Таким образом, исследование механизмов возникновения эдс в сильных электромагнитных полях и динамики деформационных эффектов методами фазовых траекторий и циклических процессов термодинамики является актуальным и имеет теоретическую и практическую перспективу.

Степень изученности проблемы. Исследовано влияние сверхвысоко частотного (СВЧ) поля на р-n-переход. В СВЧ диапазоне частот в областях объемного заряда и базах р-n-перехода возникают как конвекционные токи, так и токи смещения. Однако в литературе конвекционный ток не учитывался, его считая незначительным.

В работах [1,2] исследовалось влияние СВЧ волны на полупроводник. Однако авторы работы не учитывали тот факт, что часть полупроводника находится в волноводе, а остальная его часть находится вне волновода. Если учесть этот немаловажный факт, то будет понятно, что между носителями зарядов, находящимися под влиянием СВЧ волны, и носителями зарядов, на которых не действует СВЧ поле, возникнет разность температур, которая вероятно будет способствовать возникновению вихревых токов.

В работе [3] исследована зависимость тока через образец при постоянном напряжении от импульса гидростатического давления при температуре 293К для образцов р-Si(Ni). А в работе [2] были изучены процессы установления и исчезновения термоэдс на р-n-переходе после начала и окончания импульса, греющего СВЧ электрического поля. Но в этих работах при исследованиях не применялся метод фазовых портретов. Применение методов фазовых портретов дает преимущество увидеть все возможные процессы с одной точки зрения, проследить за влиянием внешних воздействий на ход процесса через сдвиги фазовых траекторий, наблюдать структурные изменения в материале при циклическом воздействии деформации.

Таким образом, в существующей литературе оказались не рассмотренными следующие важные проблемы:

1. В СВЧ полях вихревые токи исследованы недостаточно.
2. Динамика деформационных эффектов исследована не достаточно. Не проанализированы зависимости сопротивления $R(\epsilon)$ полупроводника от наложенной деформации $\epsilon(t)$.

3

3. Роль баллистических фототоков при формировании больших напряжений в пленочных полупроводниках исследована недостаточно.

4. Не исследовано влияние света на $R(\epsilon)$ портреты деформационных эффектов.

Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР. Основные результаты диссертационной работы выполнены в рамках проекта Государственного гранта Ф.2-1.55 «Новые механизмы возникновения электродвижущих сил в полупроводниках» 2003-2007гг. и

Государственного гранта ОТ-Ф2-077* «Динамика деформационных эффектов полупроводниковых плёнок и воздействие электромагнитных волн на токи возникающие в полупроводниковых плёнках» 2007-2011гг, а также гранта ФА-Ф2-Ф034_”Усталостная повреждаемость гетерогенных полупроводниковых материалов с очень сложной динамикой”. Автор является одним из исполнителей этих проектов.

Цель исследования. Целью диссертации является исследование механизмов возникновения ЭДС в p-n-переходах в сильных СВЧ полях и описание динамики деформационных эффектов в тензочувствительных плёнках методами термодинамики циклических процессов.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 полученные при вакуумном напылении и p-Si(Ni) легированные примесями с глубокими уровнями. Предметом исследования является изучение закономерностей зависимости сопротивления от деформации, а также генерационные и рекомбинационные процессы, происходящие при наложении деформации и СВЧ поля.

Методы исследований: метод фазовых траекторий широко применяемый в теории колебаний, а также метод численных экспериментов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обнаруженное уменьшение вихревых токов в p-n-переходе высокочастотным квазипотенциалом.
2. Закрытые $R(\epsilon)$ траектории деформационных кривых обусловленные электронными процессами. Открытые $R(\epsilon)$ траектории обусловленные изменением параметров решетки полупроводника.
3. Механизмы увеличения коэффициента тензочувствительности сильнокомпенсированного полупроводника при освещении собственным светом.

Научная новизна работы:

1. Впервые показано, что ЭДС возникающая за счёт неоднородного распределения электромагнитного поля уменьшает вихревые токи в p-n-переходе.
2. Впервые применён метод фазовых портретов для исследования деформационных эффектов в полупроводниках. Метод фазовых портретов позволяет интерпретировать все возможные процессы с одной точки зрения.
3. Установлено влияние освещения собственным светом на $R(\epsilon)$ зависимости деформационных эффектов. Показано, что коэффициентом тензочувствительности освещённого p-n-перехода и собственного полупроводника можно управлять деформацией ϵ , частотой и интенсивностью света.

0

Научная и практическая значимость результатов исследования. Метод фазовых траекторий и термодинамики циклических процессов может быть широко применён при исследовании динамики деформационных эффектов в полупроводниках. Результаты исследования по тензочувствительности могут использоваться при разработке нового поколения тензопреобразователей с управляемой чувствительностью.

Реализация результатов. Открытые фазовые портреты могут быть использованы для определения и контроля усталости полупроводниковых материалов. Результаты исследования по тензочувствительности могут использоваться при разработке нового поколения тензопреобразователей с управляемой чувствительностью.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на Республиканских и международных научных конференциях «Рост, свойства и применение кристаллов» (Андижан, 2008); “Иктидорли талабалар, магистрлар, аспирантлар, докторантлар ва мустақил изланувчиларнинг илмий-амалий анжумани” (Наманган, 2008); «Хозирги замон

физикасининг долзарб муаммолари» II-Республика илмий-назарий конференцияси (Термез, 2004); международной конференции по «Фотоэлектрическим и оптическим явлениям в полупроводниковых структурах» (Фергана, 2006); международной конференции «Неравновесные

процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах» (Ташкент 2007) а также на семинарах лабораторий полупроводникового направления и объединенном семинаре при Специализированном совете Физико-технического института НПО «Физика-Солнце» АН РУз.

Опубликованность результатов. Основные результаты работы опубликованы в 5 реферируемых журналах, из них 4 в зарубежных журналах и в 6 тезисах докладов на конференциях, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитированной литературы из 80 наименований. Она содержит 108 страниц машинописного текста, включая 26 рисунков и приложений.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность темы и выбор объектов исследования, изложены цель, задачи, новизна результатов и практическая ценность работы.

Первая глава посвящена обзору литературных данных по исследованию взаимодействия сильных электромагнитных волн с р-п-переходами. Проанализировано влияние сильного сверхвысокочастотного поля на генерационные процессы и механизмы возникновения рекомбинационных токов. Исследовано влияние переменной деформации на межзонные термические переходы. Рассмотрены колебательные процессы с помощью фазовых траекторий. Показано, что циклические и не циклические деформационные эффекты могут быть описаны как фазовые портреты колебательных процессов. Далее исследовано влияние деформации на фотоэдс, возникающие в различных условиях. Проанализировано проявление влияния баллистических фототоков в различных полупроводниковых плёнках.

Во второй главе исследовано влияние сильного сверхвысокочастотного поля на изменение концентрации электронов и дырок в р-п-переходе. Сделан вывод, что р-п-переход подвергнутый воздействию сверхвысокочастотной волны становится генератором эдс и токов. Отмечено, что сверхвысокочастотная волна оказывает статистическое и динамическое воздействие на р-п переход. Статистическое воздействие проявляется при разогреве электронов и дырок а динамическое воздействие при быстром изменении высоты барьера р-п-перехода. Другая форма динамического воздействия это влияние сверхвысокочастотного квазипотенциала на вихревые токи. В неоднородном электромагнитном поле на электронный газ электромагнитное поле оказывает давление. Это должно давать вклад в токи, генерируемые образцом, находящемся в волноводе. Показано, что в этих условиях в р-п-переходе возникают вихревые токи. Установлено, что сверхвысокочастотный квазипотенциал уменьшает вихревые токи в образце, как показано на рис. 1 и рис. 2.

$$E_1 \neq 0$$

p n

$$T_e = T_h = T_0 \quad T_e = T_h = T_0$$

e, T_h

$$\begin{array}{c} | \\ | \\ | \\ | \end{array} \left(\begin{array}{c} | \\ | \\ | \\ | \end{array} \right)$$

$$T_e \phi$$

$$\left(\right) \alpha_h T_h - T_0 + \Phi_h \left(\right) \alpha_e T_e - T_0 + \Phi_e$$

$$- - 1$$

$$^0 T$$

$$0$$

Рис. 1. Одномерное схематическое изображение р-п-перехода для учёта вклада квазипотенциала.

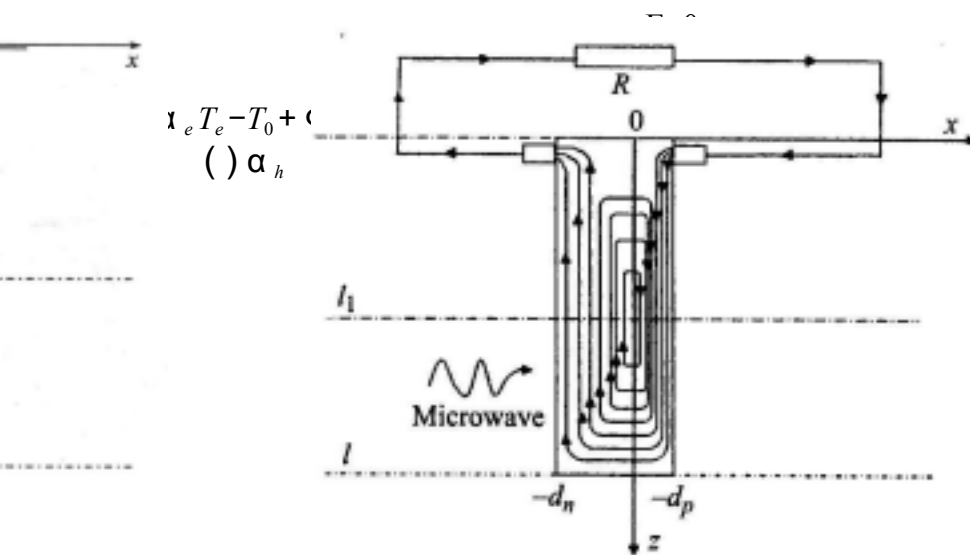
5

Для ЭДС, генерируемой в сильном сверхвысокочастотное поле получено следующее выражение:

$$E = - \frac{e}{T_0} \left(T_e - T_0 + \Phi_e \right) - \frac{e}{T_0} \left(T_h - T_0 + \Phi_h \right) \quad (1)$$

Здесь $\left(T_e - T_0 + \Phi_e \right)$ и $\left(T_h - T_0 + \Phi_h \right)$ - термоэдс и квазипотенциал электронов и дырок

$T_e - T_0 + \Phi_e$ - термоэдс электронов и дырок р-п-перехода.



$T_h -$ $E \neq 0$

$T_0 +$

Φ_h

$$T_e - T_0 + \Phi_e$$

$$- -1$$

$0T$

$$0$$

а) расположение р-п-перехода в волноводе. Б) распределение вихревых токов в образце. **Рис.**

2. Двумерное схематическое изображение р-п-перехода для учёта вклада квазипотенциала.

Третья глава посвящена исследованию влияния переменной деформации на электропроводность полупроводника. Показано, что влияние переменной деформации на сопротивление образца может быть описано с помощью $R(\epsilon)$ траекторий. При воздействии переменной деформации между генерацией и изменением концентрации существует некое запаздывание. Скорость генерации $g(\epsilon)$, обусловленная изменением ширины зоны или высоты барьера, относительно быстро приспосабливается к внешним давлениям, т.е. практически повторяет зависимость давления от времени. Однако, концентрация неравновесных носителей зарядов определяется не мгновенным значением скорости генерации, а всеми предыдущими значениями $g(\epsilon)$. Концентрация неравновесных носителей описывается следующим уравнением непрерывности

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\nabla \cdot I_n + g$$

$$(2)$$

где, I_n плотность тока электронов, τ - время жизни электронов. В однородном образце уравнение непрерывности имеет вид

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{I_n}{\tau} + g$$

$$(3)$$

Учитывая, что между генерацией и изменением концентрации неравновесных носителей зарядов существует некое запаздывание, решение уравнения непрерывности для случая, когда деформация ϵ является произвольной функцией времени, имеет вид

$$n(t) = \int_0^t g(t') e^{-\frac{t-t'}{\tau}} dt' + n_0$$

$$(4)$$

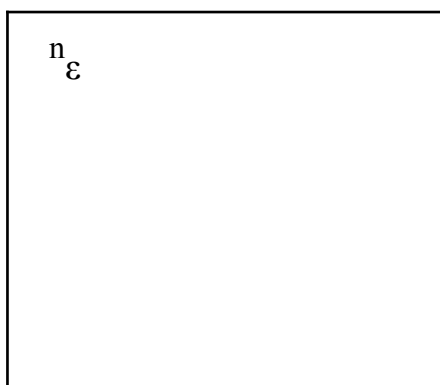
6

Чтобы продемонстрировать методику получения n_ϵ - ϵ зависимости рассмотрим слабую

ϵ . Тогда выражение (4) может быть представлено в виде Δ

деформацию, т.е. $\epsilon \ll 1$
 kT

Отклик концентрации избыточных электронов на деформацию в случае $\omega\tau=1$ показан на рис.3.



n

ϵ

$0 \epsilon 3 6$

а) Зависимость концентрации от времени (сплошные кривые),
ависимость деформации от времени
(пунктирные кривые)

б) $n(\epsilon)$ траектория процесса деформации образует гистерезисную петлю.

Рис. 3 Отклик концентрации избыточных электронов на деформацию

Зависимость n_e от амплитуды ϵ при воздействии прямоугольного импульса деформации показана на рис. 4, откуда видно, что при уменьшении амплитуды размеры петли уменьшаются как по высоте, так и по ширине.

На рис. 5 показаны релаксационные траектории. Замкнутые релаксационные траектории обусловлены только электронными процессами, открытая винтовая траектория на R - ϵ плоскости обусловлена необратимыми изменениями характеристик кристаллической решетки.

ϵ



$T_i T^0 t$
 n_e

$\epsilon \epsilon_1 \epsilon_2$

7

а) Зависимость ϵ от времени для
прямоугольных импульсов

б) Зависимости концентрации n_e от деформации ϵ для прямоугольного импульса ΔR

Рис. 4. Зависимость n_e от амплитуды ϵ

ΔR

ε

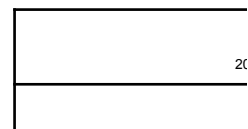
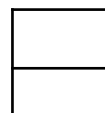
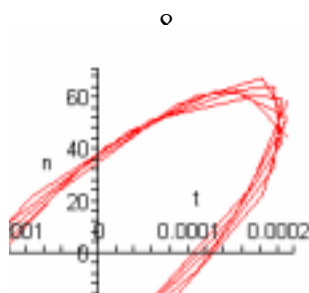
а) Для замкнутых траекторий

релаксация только электронная б) Срыв петли обусловлен структурными изменениями в образце

Рис. 5. Релаксационные траектории

Исследована динамика деформационных эффектов тензочувствительных полупроводниковых плёнок Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 полученных при вакуумном напылении в лаборатории полупроводниковых датчиков ФТИ АН РУз. Для некоторых плёнок фазовые портреты при приложении циклических деформаций с увеличением числа циклов почти не менялись (рис. 6 б). На наш взгляд это свидетельствует о том, что параметры плёнки с увеличением числа циклов остаются постоянными, а изменение сопротивления в образце обусловлено в основном электронными процессами. Для подтверждения этих соображений проведены теоретические расчёты фазового портрета, когда параметры полупроводника не зависят от времени. Результаты расчёта приведены на рисунке 6 а. Действительно фазовый портрет получается замкнутым и есть большое сходство эксперимента и теории, что является убедительным свидетельством в пользу электронных процессов в образцах.

В зависимости от условия получения характеристики большинства плёнок получаются нестабильными. На рис. 7 приведены типичные фазовые портреты таких плёнок. Как видно из рисунка с увеличением числа циклов фазовые портреты сильно перемещаются в фазовой плоскости сопротивление деформация. На наш взгляд, такая нестабильность может быть вызвана структурными изменениями в исследуемых образцах. Для теоретического описания этих изменений можно предположить, что параметры плёнки зависят от времени или то же самое от числа циклов. Были проведены расчёты фазовых портретов учитывающие изменение параметров с увеличением числа циклов. На рис. 7 б. приведены результаты этих расчётов. Как видно из рисунка фазовый портрет в этом случае со временем меняется и получаются не замкнутые траектории. Это является подтверждением нестабильности характеристик параметров исследуемых образцов.



экспериментальными данными этих работ(рис.8) мы получили фазовые портреты которые

9

приведены на рис. 9 и 10. Как видно из рис. 4 фазовые портреты изотермического процесса деформации имеют прямоугольную форму. Однако фазовый портрет экспериментальных данных работы изменение тока в сильно компенсированных образцах p-Si(Ni) имеет некоторое отклонение от прямоугольной формы. Чем же можно объяснить такое отклонение эксперимента от теории? Это можно объяснить следующим образом. При теоретическом рассмотрении мы пренебрегали изменением температуры, считая её постоянной, а в эксперименте как видно из рисунка 8, температура не постоянна и изменяется в диапазоне от 289 до 301 градусов по шкале Кельвина. Эта дополнительная генерация носителей и приводит к отклонению фазовых портретов от прямоугольной формы. Рассмотрены фазовые портреты кинетики установления то

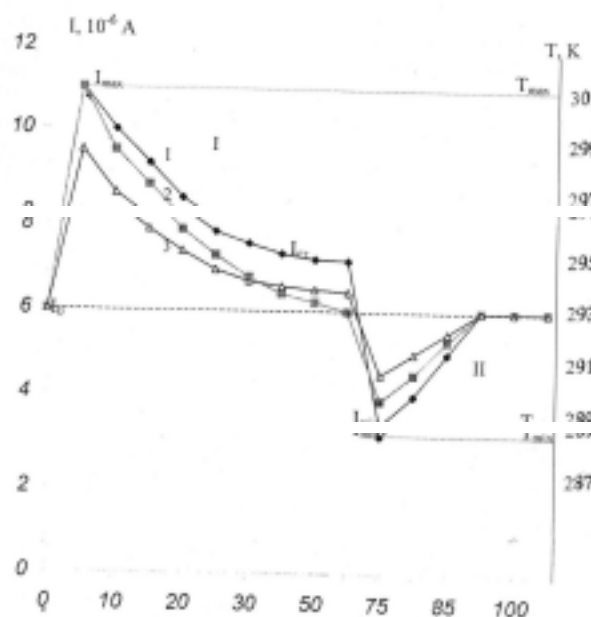


Рис. 8. Кинетические зависимости тока $I=f(t)$ в сильно компенсированных образцах p

$dP /$

8

$Si(Ni)$ при воздействии импульса (I) и после снятия (II) ВГД со скоростью $\frac{dP}{dt}$

= 10 при

$T = 293K$ 1- $P=5 \cdot 10^8$ Па, 2- $P=2,5 \cdot 10^8$ Па, 3- изменение температуры при $P=5 \cdot 10^8$ Па. [3] ков в сильных СВЧ полях. Сделан вывод, что фазовые портреты могут успешно использоваться при анализе кинетики установления, термоэдс горячих электронов в сильных СВЧ полях.

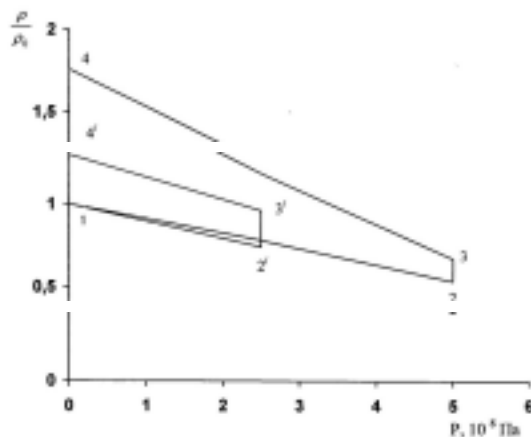
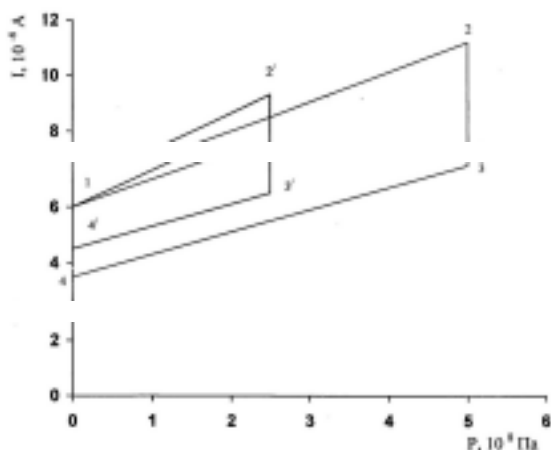


Рис.9 I(P) портрет ток-давление в сильно компенсированных образцах p-Si(Ni) при воздействии импульса и после снятия ВГД со

$$\frac{dP}{dt} \cdot 10^8$$

скоростью Па с

Рис.10 R(P) портрет

$$\frac{dR}{dt}$$

= при T=293 К.

$$\frac{dR}{dt}$$

сопротивления-давление в сильно компенсированных образцах p Si(Ni) при воздействии импульса ВГД со

$$\frac{dP}{dt} \cdot 10^8$$

скоростью Па с

= при T=293 К.

Длительность импульса давления 60 с.

10

Исследовано влияние освещения на тензочувствительность. Рассмотрен случай, когда частота света близка к красной границе.

При освещении коэффициент тензочувствительности (КТЧ)

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial R}{\partial P} \right)_{\epsilon} = \left(\frac{\partial R}{\partial P} \right)_{\epsilon} + \left(\frac{\partial R}{\partial P} \right)_{\epsilon} \\ & \frac{KTЧ}{\epsilon} = \left(\frac{\partial R}{\partial P} \right)_{\epsilon} + \left(\frac{\partial R}{\partial P} \right)_{\epsilon} \end{aligned}$$

Вблизи красной границы $J_s(I) = 0$ (ϵ) $\tau \alpha I E \epsilon_s^J$

$$\begin{aligned} & I = I_0 \text{ интенсивность света } i \\ & \tau \alpha I = \tau \alpha I \quad \tau \alpha I \quad \tau \alpha \\ & \epsilon \tau \alpha + = + \\ & J I \quad \Delta \quad \Delta \\ & KTЧ () + \\ & = + = KTЧ \\ & (\rightarrow 0) (0) () 0^0 \\ & \epsilon \\ & J_{kT} \epsilon \quad J_{kT} \epsilon \quad J \quad \epsilon \\ & s J_0 \end{aligned}$$

SSS

КТЧ p-n-перехода при обратном смещение при освещении увеличивается T

$$\alpha I_3$$

$$\tau = c \alpha I \epsilon, 0 \sim 10 \cdot 10^{-10} =$$

$$\sim 10^{-2}, 10^{-18}, 10^{-10}, 10^{-3}, 10^{-4} \epsilon =$$

$KTC = KTC + \approx 10^0$ т.е. освещение на красной границе сильно увеличивает коэффициент

тензочувствительности. В работе [4] рассмотрена зависимость тока короткого замыкания аномальные фотонапряжения плёнок CdTe:Ag под механической деформацией и изменение коэффициента фототензочувствительности пленок при растяжении и сжатии (рис.11).

Экспериментально спектр K_V поглощение вблизи

имеет максимум в области края собственного

энергии фотона $h\nu = 1.3 \text{ эВ}$ при деформации растяжения ³

$$2 \cdot 10^{-2}$$

$\epsilon = + \cdot$ (в относительных единицах,

и при сжатии ³

$$2 \cdot 10^{-2}$$

$$\approx 800 K_V$$

влиянию освещения на

$\epsilon = - \cdot - \approx 300 K_V$). Наши исследования по

фазовые портреты деформационных эффектов показали, что вблизи

границы собственного поглощения тензочувствительность сильно компенси-рованного полупроводника должна возрастать. При частотах меньше собственной частоты поглощения тензочувствительность образца должна слабо зависеть от частоты света, а при частотах больше собственной частоты поглощения за счёт увеличения концентрации неравновесных носителей тензочувствительность должна резко падать. Действительно из рис.11 видно, что коэффициент тензочувствительности освещенного полупроводника при больших частотах резко падает.

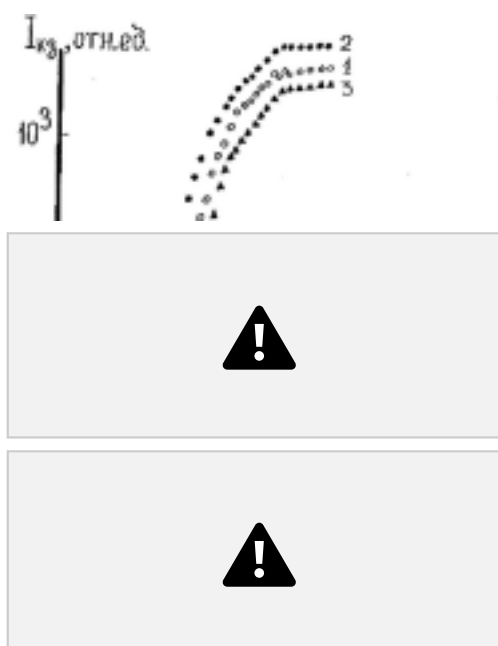


Рис. 11 Зависимость тока короткого замыкания АФН плёнок CdTe:Ag под действием механической деформацией $\epsilon = \pm \cdot$ На вставке показаны изменение коэффициента фототензочувствительности пленок при растяжении и сжатии [4]

Рассмотрена спектральная зависимость тензочувствительности р-п-перехода. Вольтамперная характеристика тонкого р-п-перехода имеет вид.

$$j = j_s \left(\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right) \quad (11)$$

КТЧ р-п-перехода будем определять по формуле при постоянном напряжении U :

$$KTЧ = \frac{\Delta j}{j \epsilon} = \frac{\Delta j}{j} \cdot \frac{1}{\epsilon} \quad (12)$$

$\epsilon = \frac{dl}{l}$ - относительная деформация.

Относительное изменение тока определяется относительным изменением тока

насыщения. $j_s \Delta$

$$\Delta j_s \quad (13)$$

= равен

j

j_s

КТЧ р-п-перехода

$$K^{\Delta R}$$

$$= (14)$$

$$R \epsilon$$

$$\Delta$$

$$j_{KTCH} \Delta$$

При малых токах $\ll 1$
 $\frac{kT}{U}$

= - как у КТЧ в режиме генератора

$$\frac{j_s}{I} = \frac{j}{j_s}$$

$$KTCH \Delta$$

$KTCH = \frac{U}{kT}$. При обратных токах $U < 0$
 $\frac{KTCH}{U}$ напряжений $I U$ = . При прямых токах КТЧ

падает, режим генератор тока удобен для измерений. В режиме генератора напряжения КТЧ не зависит от тока; в режиме генератора тока КТЧ зависит от величины тока и при больших токах

$$\frac{KTCH}{U} = \frac{KTCH}{I} \ln \left(1 + \frac{j}{j_s} \right) \quad \text{когда } \frac{j}{j_s} \gg 1$$

логарифмически с ростом тока.

Рассмотрено влияние света на тензочувствительность и КТЧ освещённого р-п-перехода. Сделан вывод, что тензочувствительность освещённого р-п-перехода управляется постоянной ϵ , частотой света ω и её интенсивностью I_0

деформацией ϵ_0 . Вблизи критических точек под действием деформации коэффициент поглощения может сильно измениться и вследствие этого коэффициент тензочувствительности р-п-перехода может принимать аномально большие значения.

Четвертая глава посвящена исследованию возникновения реактивной фотоЭДС в полупроводниковых плёнках. Обсуждается возможность проявления баллистической фотоэдс в различных ситуациях и показано, что реактивные фототоки проявляются во многих случаях. Показано, что в тонких плёнках, толщина которых порядка длины свободного пробега фотоэлектронов, фотоэдс может быть обусловлена баллистическими фототоками.

Рассматривается аномально большая фотомагнитная эдс, обусловленная баллистическими фототоками. Показано что зависимость аномального фотонапряжения от частоты может быть объяснена зависимостью коэффициента поглощения от энергии фотонов $\hbar \omega$. Скорость

$$v \sim \hbar \omega - E_g$$

$$\alpha = \hbar \omega - E_g \sim \hbar \omega - E_g$$

и в том и другом случае

должна давать вклад в фотомагнитное напряжение. Далее влияние деформации на АФН –эффект объясняется с помощью реактивных фототоков.

В работе [4] наблюдается зависимость аномально больших фотонапряжений от деформации (рис.12). Результаты экспериментов можно объяснить реактивными фототоками, поскольку энергия фотоэлектронов сразу после рождения в зоне определяется частотой света и деформацией. Согласно уравнению Эйнштейна максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - (E_g + \Delta\varepsilon) \quad (15)$$

$$\approx \nu \pm \left(\frac{\Delta\varepsilon}{h\nu} \right) \varepsilon = \nu - \left(\frac{\Delta\varepsilon}{h\nu} \right) \varepsilon$$

вблизи границы собственного поглощения

$$\Delta \approx \frac{mv^2}{2} \approx \Delta\varepsilon$$

$$eU \quad (16)$$

т.е. должна наблюдаться линейная зависимость тормозного напряжения от деформации.

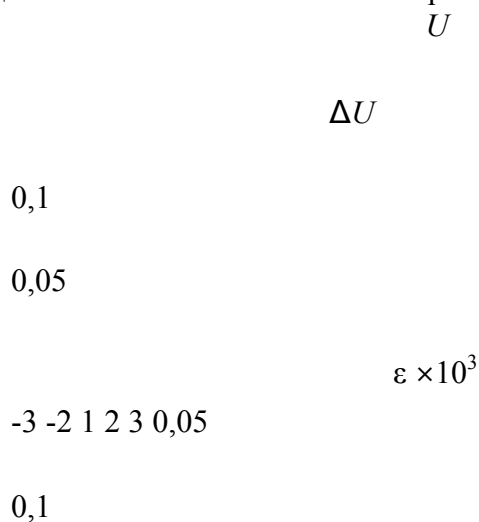


Рис. 12. Относительное изменение $\Delta U/U$ при механической деформации плёнок CdTe : Ag. Естественное освещение $L = 3 \cdot 10^3 \text{ лк}$ $T = 300\text{K}$

Отсюда следует, что если АФН эффект обусловлен реактивными фототоками в тонких плёнках должна наблюдаться прямо пропорциональная зависимость АФН напряжения от деформации. Как видно из рис. 12 в пределах деформации $\pm(1-3) \cdot 10^{-3}$ относительное изменение $\Delta U/U$ меняется от 0 до 0,1. Этот важный вывод является убедительным подтверждением того, что АФН эффект в плёнках CdTe: Ag обусловлен реактивными фототоками.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сверхвысокочастотная волна оказывает как статистическое так и динамическое воздействие через разогрев электронного газа и изменение высоты барьера p-n перехода.

Это возмущение всегда приводит к увеличению рекомбинационного тока в р-п-переходе.

2. Оценки токов в одномерной модели не корректны. В двумерном описании расчётов токов возникают вихревые токи.
3. Сверхвысокочастотный квазипотенциал уменьшает вихревые токи возникающие в р-п-переходе.
4. Замкнутые $R(\epsilon)$ траектории обусловлены электронными процессами, открытые $R(\epsilon)$ траектории обусловлены изменениями параметров решетки полупроводника.
5. Освещение сильно изменяет $R(\epsilon)$ портрет деформация-проводимость вдоль оси проводимости.
6. Освещение собственным светом увеличивает тензочувствительность полупроводника.
7. Построены $R(\epsilon)$ портреты кинетики установления термоэдс горячих носителей в р-п-переходе.
8. Коэффициент тензочувствительности р-п-перехода вблизи собственного поглощения сильно возрастает.
9. Реактивные фототоки увеличивают фотоэдс генерируемую р-п-переходом.
10. Линейная зависимость АФН напряжения от деформации является подтверждением баллистического механизма возникновения фотоэдс.

Цитированная литература:

1. Н.А.Аблязимова, А.И.Вейнгер, В.С.Питанов. Влияние сильного СВЧ поля на фотоэлектрические свойства кремниевых р-п-переходов // ФТП – Санкт Петербург, 1992. - Т.26. №6. - С. 1041-1047.
2. А.И.Вейнгер, М.П.Саргсян. Кинетика термоэдс, возникающей на р-п-переходе при разогреве носителей заряда // ФТП– Санкт Петербург, 1980.- Т.14. вып. №10.-С.2020-2028.
3. О.О.Маматкаримов. Тензоэлектрический эффект в кремнии с глубокими уровнями и в структурах на их основе: Дис. ... док. физ.-мат. наук. – Ташкент: НУУ, 2003. – 250с.
4. С.М.Отажонов. Аномальные фотоэлектрические явления в полупроводниковых плёночных структурах из соединений A_2B_6 с глубокими примесными уровнями; Дис. ... док. физ.-мат. наук. – Ташкент: ФТИ АН РУз, 2005. – 298с.

4. СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Г.Гулямов, С.Р.Бойдедаев, М.Г.Дадамирзаев, А.Г.Гулямов. Аномально большие фотонапряжения в полупроводниковых пленках, обусловленные реактивной фотоэдс // «Альтернативная энергетика и экология». – Россия, г.Саров, 2007. - №5(49).- С.103-107.
2. M.Ahmetoglu, S.H.Shamirzaev, G.Gulyamov, M.Dadamirzayev, A.G.Gulyamov. Change in the resistance of the semiconductor in the variable deformation field. // Rom. Journ.Phys.- Bucharest, 2007.- vol.52. No 3-4.- p. 319-327.
3. С.Х.Шамирзаев, Г.Гулямов, М.Г.Дадамирзаев, А.Г.Гулямов. Коэффициент не-идеальности вольт-амперных характеристик р-п-переходов в сильном сверхвысоко-частотном поле. // ФТП – Санкт Петербург, 2009. - Т.43. №1. - С. 53-57.
4. С.Х.Шамирзаев, Г.Гулямов, М.Г.Дадамирзаев, А.Г.Гулямов. Вихревые токи, возникающие на р-п-переходе в сверхвысокочастотном электромагнитном поле. // ФТП – Санкт Петербург, 2009. - Т.43. №9. - С. 1210-1213.
5. С.Х.Шамирзаев, Г.Гулямов, М.Г.Дадамирзаев, А.Г.Гулямов. Электродви-жущая сила на выпрямляющем барьере в сверхвысокочастотном электромагнитном поле. // УФЖ– Ташкент, 2009.- Т.11. №2.- С.122-127.
6. Г.Гулямов, М.Г.Дадамирзаев, С.Р.Бойдедаев, А.Г.Гулямов. Коэффициент не-идеальности ВАХ р-п-перехода в сильном СВЧ поле // Материалы международной конференции по

«Неравновесные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах»:Тез. докл. Респ. науч. конф. 1-3 февраля 2007. – Ташкент, 2007.-С. 147.

14

7. С.Х.Шамирзаев, М.Г.Дадамирзаев, Г.Гулямов, С.Р.Бойдедаев, А.Г.Гулямов. Ўта юкори частотали (ЎЮЧ) электромагнит майдонидаги ўтказувчанлик ва силжиш тоқларини баҳолаш // «Замонавий физиканинг фундаментал ва амалий муаммолари» Респ. илмий амалий конференция материаллари: Тез. докл. Респ. науч. конф 18-19 мая 2007.- Ташкент, 2007.-С. 75.
8. Г.Гулямов, М.Г.Дадамирзаев, С.Р.Бойдедаев, А.Г.Гулямов. Кучли ЎЮЧ майдондаги р-п ўтишда ўтказувчанлик ва силжиш тоқлари. «Ракобатбардош кадрлар тайёрлаш: тажриба ва муаммолар» // Республика илмий-амалий конференцияси материаллари тўплами (III-кисм).- Наманган, 2007.-С. 12.
9. Г.Гулямов, С.Р.Бойдедаев, А.Г.Гулямов. УЮЧ майдондаги тугриловчи контактда электронларнинг кизиши ва тоқнинг тўгриланиши. // «Проблемы альтернативной энергетики и энергосбережения»: Материалы трудов республиканской научно практической конференции. Наманган: Наманганский инженерно-педагогический институт, 2007.-С.86.
10. Гулямов, М.Г.Дадамирзаев, С.Р.Бойдедаев, А.Г.Гулямов. Реактив фотоэюк билан боғланган аномал катта фотокучланишлар // «Проблемы альтернативной энергетики и энергосбережения»: Материалы трудов республиканской научно-практической конференции. Наманган: Наманганский инженерно-педагогический институт, 2007.-С.87.
11. Г.Гулямов, М.Г.Дадамирзаев, А.Г.Гулямов. ЎЮЧ электромагнит майдондаги р-п-ўтишда ҳосил бўладиган уюрмали тоқлар // «Рост, свойства и применение кристаллов»:Материалы V-ой Республиканской научной конференции.- Андижан: Андижанский государственный университет, 2008. С.125.

РЕЗЮМЕ

диссертации Гулямова Абдурасула Гафуровича на тему: «Динамика деформационных эффектов и реактивные фототоки в полупроводниковых плёнках» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников.

Ключевые слова: горячие электроны, баллистические фототоки, реактивные фототоки, высокочастотный квазипотенциал, $R(\epsilon)$ траектории и портреты, динамическая тензочувствительность, вихревые токи, аномально большие фотонапряжения.

Объекты исследования: тензочувствительные плёнки Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 полученные при вакуумном напылении, сильнокомпенсированный кремний с глубокими уровнями, кремниевые р-п-переходы, АФН плёнки CdTe и Si .

Цель работы: исследование механизмов возникновения ЭДС в р-п-переходах в сильных СВЧ полях. Описание динамики деформационных эффектов в тензочувствительных плёнках методами фазовых траекторий и термодинамики циклических процессов.

Метод исследования: методы $R(\epsilon)$ траекторий и термодинамики циклических процессов.

Моделирование деформационных эффектов. Численные эксперименты.

Полученные результаты и их новизна:

1. Впервые показано, что ЭДС, возникающая за счёт неоднородного распределения электромагнитного поля, уменьшает вихревые токи в p-n-переходе.

15

2. Впервые применён метод фазовых портретов для исследования деформационных эффектов в полупроводниках. Метод фазовых портретов позволяет интерпретировать все возможные процессы с одной точки зрения.

3. Установлено влияние освещения собственным светом на $R(\epsilon)$ зависимости деформационных эффектов. Показано, что коэффициентом тензочувствительности освещённого p-n-перехода и ϵ , частоты и собственного полупроводника можно управлять с помощью деформации σ интенсивности света.

Практическая значимость: метод $R(\epsilon)$ траекторий может быть использован при контроле характеристик полупроводников. Результаты исследования тензочувствительности могут быть использованы при разработке нового поколения полупроводниковых пленочных тензопреобразователей с управляемой чувствительностью.

Степень внедрения и экономическая эффективность: результаты работы могут применяться в электронной промышленности, в области энергетики и в разработке новых видов тензодатчиков, в научных исследованиях по определению концентрации генерационных центров и скорости генерации в полупроводниках. Полученные результаты могут быть использованы в учебном процессе в высших учебных заведениях.

Область применения: микроэлектроника, физика твердого тела, физика полупроводников, тензометрия, оптоэлектроника.

Физика-математика фанлари номзоди даражасига талабгор Гулямов Абдурасул Гафуровичнинг 01.04.10-яримўтказгичлар физикаси ихтисослиги бўйича “Деформацион эффектлар динамикаси ва яримўтказгич пардаларида реактив фототоклар” мавзусидаги диссертациясининг

РЕЗЮМЕСИ

Таянч сўзлар: иссиқ электронлар, баллистик фототоклар, реактив фототоклар, юкори частотали квазипотенциал, $R(\epsilon)$ траекториялари ва портрети, динамик тензосезгирлик, уюрмали токлар, аномал катта фотокучланишлар.

Тадқиқод объектлари: вакуумли чанглатилиш орқали олинган Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 тензосезгир плёнкалар, чуқур сатхли кучли компенсацияланган кремний, кремнийли p-n-ўтишлар, CdTe ва Si АФК плёнкалари.

Ишнинг мақсади: ўта юкори частотали майдондаги p-n-ўтишларда электр юритувчи кучларнинг ҳосил бўлиш механизмларини тадқиқ қилиш ва тензосезгир плёнкалардаги деформацион эффектлар динамикасини циклик жараёнларни термодинамик усули орқали ёритиш.

Тадқиқод методлари: тебранишлар назариясидаги фазалар портрети методи. Деформацион эффектларни моделлаштириш. Сонли экспериментлар.

Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги:

1. Электромагнит майдоннинг нотекис тақсимланиши натижасида юзага келадиган ЭЮК, p-n ўтишдаги уюрмавий токларни камайтириши илк бор кўрсатиб берилди.
2. Яримўтказгичларда деформацион эффектларни тадқиқ қилиш учун биринчи марта фазалар портрети усули қўлланилди. Фазалар портрети усули барча кечаётган жараёнларни шархлаш имконини беради.
3. Деформацион эффектлар $R(\epsilon)$ траекторияларига хусусий ёруғликнинг таъсири аниқланди. Ёритилган p-n-ўтишнинг ва хусусий яримўтказгичнинг тензосезгирлик коэффициентини ϵ деформация, ёруғлик частотаси ва интенсивлиги билан бошқариш мумкинлиги

кўрсатиб берилди.

Амалий ахамияти: $R(\epsilon)$ траекторияси усули яримўтказгичларда деформацион эффектлар динамикасини тадқиқ қилишда кенг қўлланиши мумкин. Тензосезгирлик бўйича олинган тақиқод натижаларидан янги сезгирлигини бошқариш мумкин бўлган тензодатчиклар олишда фойдаланиш мумкин.

Татбиқ этиш даражаси ва иқтисодий самарадорлиги: электрон саноати, асбобсозлик ва энергетика соҳасида янги тензодатчиклар яратилишида ишлатилади. Илмий тадқиқотларда

16

яримўтказгичлардаги генерация марказларининг концентрациялари ва генерация тезликларини аниқлашни самарадорлигини оширади. Олий таълим муассасаларида ўқув жараёнларида таълим самарадорлигини оширади.

Қўлланилиш соҳаси: микроэлектроника, қаттиқ жисм физикаси, яримўтказгичлар физикаси, тензометрия, оптоэлектроника.

RESUME

Thesis of Gulyamov Abdurasul Gafurovich on the scientific degree competition of the doctor of philosophy in physical-mathematical sciences on specialty 01.04.10 - a physics semiconductor, subject: "Dynamics of deforming effect and reactive photocurrents in semiconductor film".

Key words: hot electrons, ballistic photocurrents, reactive photocurrents, radiofrequency quasipotential, $R(\epsilon)$ trajectory and portraits, dynamics of tenzosenitivity, circle currents, anomalous greater photo-tension.

Subject of research: tenzosenitivity films of Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 got under vacuum evaporation, high compensated silicon with deep level, flint p-n-transition, AGP film CdTe and Si. **Purpose of work:** is a study of mechanism origin EMF in p-n-transition in strong microwave field. The description in tenzosenivities film by methods $R(\epsilon)$ path and thermodynamics of the round robin processes.

Methods of research: the methods $R(\epsilon)$ path in theories of the fluctuations. Modeling deforming effect. The Numerical experiments.

The results obtained and their novelty:

1. For the first time it is shown, that EMF arising due to non-uniform distribution of an electromagnetic field reduces vortical currents in p-n-transition.
2. The method of phase portraits for the first time is applied to research of deformation effects in semiconductors. The method of phase portraits allows to interpret all possible processes from one point of view.
3. Influence of illumination by own light on $R(\epsilon)$ dependences of deformation effects is established. It is shown, that factor tenzosenivities the shined p-n-transition and own semiconductor it ϵ , frequency and intensity of light.

is possible to operate deformation ϵ_0

Practical value: method phase path can be use when checking the features semiconductor. The Results studies of tenzosenitivity can be used at development a new tenzogauges. **Degree of embed and economic effectivity:** results of work can be applied in electronic industry, in the field of power and in development of new kinds of strain gauges. Can are useful in scientific researches by definition of concentration generation the centers and speed of generation in semiconductors. The received results can be used in educational process in higher educational institutions.

Field of application: microelectronics, solid state physics, physics semiconductor, optoelectronics.

