

УДК 535.215

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОТОКА В ДВУХМЕРНОЙ *n-p-n* СТРУКТУРЕ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕГО ЛАЗЕРНОГО МИКРОСКОПА

С.Г. ПЕТРОСЯН¹, А.М. ХАНБЕКЯН^{2*}

¹Российско–Армянский университет, Ереван, Армения

²Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

*e-mail: akhanbekyan@gmail.com

(Поступила в редакцию 11 апреля 2017 г.)

Экспериментально исследовался фототок, индуцированный при локальном возбуждении сфокусированным до 0.17 мкм световым пучком поверхности полупроводникового элемента в планарной структуре с двумя *p-n* переходами, т. е. с помощью так называемой методики сканирующей лазерной микроскопии. Получена линейная зависимость фототока от координаты центра пучка. Высокая чувствительность структуры позволяет регистрировать перемещения порядка десятков нанометров.

1. Введение

Для автоматизации производства важную роль играют датчики перемещения, счета, размеров и т. д. При этом особенно важным представляются способы считывания информации и миниатюризация размеров самих датчиков, что позволило бы устанавливать датчики в любом геометрически малом, ограниченном пространстве. Бесконтактные датчики, в том числе так называемые позиционно-чувствительные датчики, особенно перспективны, так как позволяют получать информацию, не затрагивая саму работу прибора или установки.

При освещении двухмерных полупроводниковых структур с биполярной проводимостью, в которых *p*- и *n*-области находятся в одной плоскости, сфокусированным оптическим (лазерным) излучением из спектра его собственного поглощения возможно возникновение поперечного фототока. На основе таких структур с двухмерным электронным и дырочным газом уже созданы позиционно-чувствительные элементы с линейной зависимостью фотонапряжения от смещения пучка вдоль одной или двух координатных осей [1–3]. Существуют и другие разновидности позиционно-чувствительных датчиков.

В работе [4] теоретически и экспериментально исследованы условия регистрации фототока, линейно-зависящего от смещения возбуждающего пучка.

Исследование зависимости фототока полупроводникового датчика на основе InGaAs с лазерным возбуждением в инфракрасной области проведено в работе [5], где установлена существенная зависимость фототока от размеров и формы сфокусированного пятна возбуждающего лазерного излучения. В работе [6] теоретически исследовано возникновение поперечного фототока при локальном возбуждении лазерным пучком поверхности $n-p-n$ структуры. Показано, что знак фототока зависит от координаты центра возбуждающего светового пятна. Определены условия, при которых величина фототока является линейно-зависимой функцией от координаты центра возбуждающего светового пучка.

Целью настоящей работы являлось исследование бесконтактного микрооптического датчика перемещения на основе двумерного полупроводникового биполярного элемента. Для этой цели в работе исследовался фототок, возникающий в двумерной $n-p-n$ структуре при сканировании ее поверхности сфокусированным до 0.17 мкм лазерным пучком, т. е. использовался метод так называемой сканирующей лазерной микроскопии. Заметим, что сканирующая лазерная микроскопия не требует сложного оборудования.

2. Экспериментальная установка

Исследованные образцы были изготовлены на основе модулированно-легированной гетероструктуры p -типа GaAs/In_{0.1}Ga_{0.9}As/Al_{0.33}Ga_{0.67}As, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Структура содержала квантовые ямы из In_{0.1}Ga_{0.9}As толщиной 10 нм. После ионной имплантации атомов кремния (доноров) в отдельных участках структуры и перекомпенсации исходных акцепторов в плоскости квантовой ямы формировалась $n-p-n$ структура, состоящая из двух близкорасположенных и взаимодействующих между собой $p-n$ переходов (расстояние между линиями двумерных $p-n$ переходов меньше или порядка диффузионной длины неосновных носителей). При освещении светом имеет место его поглощение как в самой квантовой яме, так и в окружающих барьерных слоях. Созданные в барьерных слоях неравновесные носители заряда захватываются и локализуются в квантовой яме, далее диффундируют к областям поверхностного заряда переходов и разделяются поперечной компонентой контактных электрических полей. В зависимости от точки освещения в $p-n$ переходах генерируются различные фототоки, разность которых и представляет общий фототок во внешней цепи структуры. В симметричной структуре фототок отсутствует при попадании светового пучка в центр структуры и становится знакопеременным при смещении пучка влево или вправо.

Для исследования внутреннего фотоэлектрического эффекта в двумерном $n-p-n$ переходе полупроводникового элемента использовался метод сканирующей лазерной микроскопии, схема которой показана на рис.1. Пучок гелий-

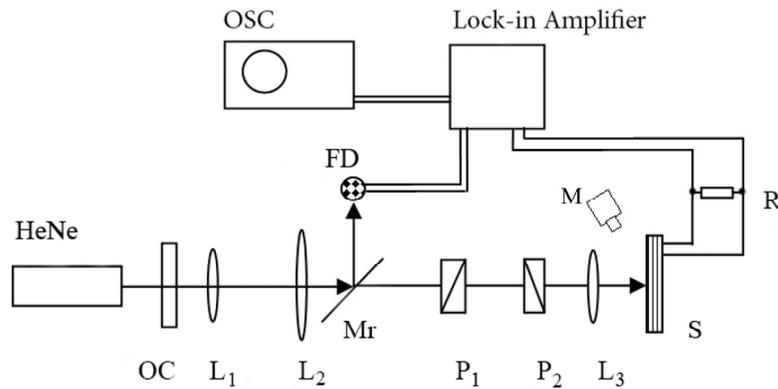


Рис.1. Экспериментальная схема лазерной микроскопии: ОС – оптический прерыватель, L_1 , L_2 , L_3 – линзы, Мг – полупрозрачное зеркало, P_1 , P_2 – поляризаторы, S – исследуемый образец, He-Ne – гелий-неоновый лазер, OSC – осциллограф, Lock-in Amplifier – усилитель, FD – фотоприемник, R – нагрузочное сопротивление, М – микроскоп.

неонового лазера диаметром 2 мм с помощью оптической системы фокусируется на поверхность $n-p-n$ перехода полупроводникового элемента. Оптическая система, формирующая световой пучок, состоит из телескопической системы, образованной линзами L_1 и L_2 , увеличивающей диаметр пучка, и фокусирующей линзы L_3 . Увеличение телескопической системы составляло 255, при этом расходимость пучка по теоретическим подсчетам составляла 7.84×10^{-5} радиан. В соответствии с расчетами диаметр пучка в фокусе линзы L_3 составлял $\Delta = 0.17$ мкм. Здесь необходимо учесть, что созданные при освещении перехода неравновесные носители локализуются в квантовой яме. Поэтому система регистрации не столь критична к диаметру сфокусированного пучка.

Фототок с полупроводникового элемента усиливался синхронизированным усилителем SR510 и регистрировался осциллографом ТДС250. Для синхронизации усилителя лазерное излучение модулировалось прерывателем. Небольшая часть модулированного лазерного излучения, отраженного от полупрозрачной пластины, направлялась на фотоприемник, сигнал с которого подавался на усилитель. Интенсивность лазерного излучения варьировалась с помощью изменения взаимной ориентации поляризаторов.

Сфокусированный лазерный пучок фиксировался, и сканирование пучка света по поверхности полупроводникового элемента проводилось посредством относительного изменения положения полупроводникового элемента, который устанавливался на столике с микрометрическими винтами, с шагом 5 мкм, что позволяло сканировать образец по трем направлениям. Для уменьшения электрических шумов полупроводниковый элемент экранировался. Последовательно к элементу подключался резистор с сопротивлением 100 кОм, сигнал с которого

подавался на усилитель.

Образец внешне представлял собой планарную структуру с двумя $p-n$ переходами, образованными между базовой p -областью двухмерного дырочного газа и двумя n -областями двухмерного электронного газа. Линии $p-n$ переходов располагались параллельно и на расстоянии l друг от друга. К n -областям подсоединялись омические контакты для регистрации возбужденного внешним световым пучком фототока. Поскольку в фотоэлементе имеются два обратно включенных $p-n$ перехода, то измеряемый фототок есть разность фототоков, индуцированных в каждой из них при заданном профиле генерации неравновесных носителей заряда. При каждом положении возбуждающего пучка измерялась величина падения напряжения на внешнем сопротивлении, возникающего из-за фототока в контуре полупроводникового элемента.

3. Результаты и их обсуждение

Исследовался сигнал фототока полупроводникового элемента при сканировании лазерного пучка между эмиттером и коллектором $n-p-n$ перехода полупроводникового элемента при мощности лазерного излучения 0.45 мВт. Зависимость фототока от координаты лазерного пучка на поверхности элемента приведена на рис.2.

Видно, что при сканировании лазерным пучком базовой p -области от одного края поверхностного заряда до другого величина фототока изменяется линейно в зависимости от координаты перемещения лазерного пучка. При

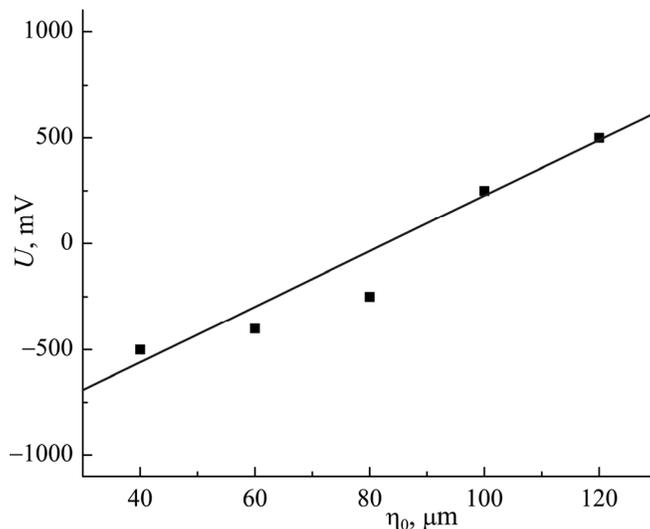


Рис.2. Зависимость падения напряжения на внешнем сопротивлении от координаты лазерного пучка при мощности лазерного излучения 0.45 мВт.

смещении пучка к центру p -области перехода, т. е. когда координата $\eta_0=1/2$, в симметричной структуре напряжение (фототок) отсутствует.

Исследовалась также зависимость фототока полупроводникового элемента от мощности лазерного излучения. Результаты измерений приведены на рис.3, откуда видно, что напряжение на внешнем сопротивлении (индуцированный фототок) при фиксированной позиции лазерного пучка зависит от мощности, т. е. при увеличении мощности лазерного излучения фототок растет и достигает насыщения.

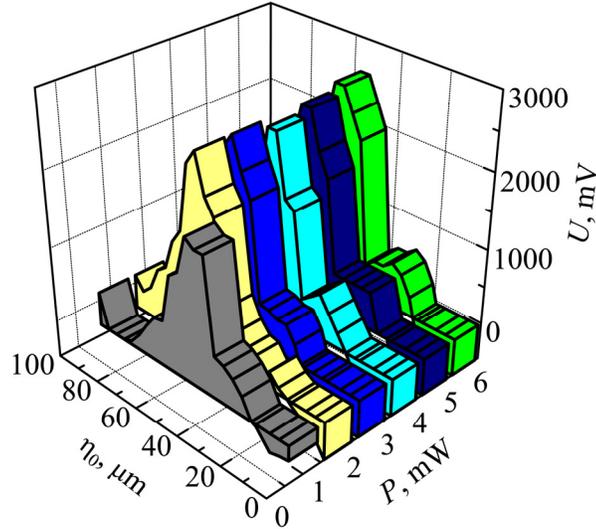


Рис.3. Напряжение на внешнем сопротивлении (индуцированный фототок), полученное при сканировании $n-p-n$ перехода полупроводникового элемента пучком лазерного излучения с мощностью: 0.1, 0.22, 0.32, 0.4, 0.5 и 0.65 мВт.

В работе [6] теоретически исследовалось возникновение поперечного фототока при локальном возбуждении оптическим пучком поверхности $n-p-n$ структуры. Показано, что величина и знак фототока зависят от координаты центра светового пятна. Для определения этой зависимости решено двухмерное уравнение непрерывности для избыточных неосновных носителей заряда в квазинейтральной части p -области и получена зависимость фототока структуры от координаты перемещения центра светового пятна:

$$I = \frac{\pi e g_n \tau_n D_n}{2 e^{l/L_n} - 1} \left\{ e^{-\frac{\eta_0 - l}{L_n} + \frac{\Delta^2}{4L_n^2}} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\eta_0 - l}{\Delta} - \frac{\Delta}{2L_n} \right) + \operatorname{erf} \left(-\frac{\eta_0}{\Delta} + \frac{\Delta}{2L_n} \right) \right] + e^{\frac{\eta_0 + \Delta^2}{L_n} + \frac{\Delta^2}{4L_n^2}} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\eta_0}{\Delta} + \frac{\Delta}{2L_n} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{\eta_0 - l}{\Delta} + \frac{\Delta}{2L_n} \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

где I – величина фототока, Δ – эффективный радиус оптического пучка, g_n – величина, пропорциональная мощности падающего излучения, $g_n = P/(\pi\Delta^2\hbar\omega)$, τ_n – время жизни электронов, D_n и $L_n = \sqrt{\tau_n D_n}$ – коэффициент и длина диффузии электронов, соответственно, η_0 – координата сфокусированного пучка, l – граница области между краями поверхностного заряда p - n переходов ($0 \leq x \leq l$) и

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt .$$

Учитывая, что в условиях нашего эксперимента $\Delta \sim 0.1$ мкм, т. е. $l \sim L_n$, а также предполагая, что $\eta_0 = 1/2 + \varepsilon$, где $\varepsilon \ll 1/2$, можно упростить выражение (1). После некоторых несложных преобразований выражения (1) окончательно получим зависимость фототока структуры от координаты центра светового пятна

$$I = 2\pi \frac{eg_n L_n e^{l/(4L_n)}}{e^{l/L_n} - 1} \varepsilon = I_0 \frac{\varepsilon}{L_n}, \quad (2)$$

где

$$I_0 = 2\pi \frac{eg_n L_n^2 e^{l/(4L_n)}}{e^{l/L_n} - 1} .$$

Как видно из выражения (2), величина фототока имеет линейную зависимость от координаты возбуждающего лазерного пучка при его малых смещениях от центра базовой области, расположенной между краями поверхностного заряда p - n перехода. Полученная на эксперименте зависимость величины фототока (напряжения на внешнем сопротивлении) от координаты возбуждающего пучка проявляет такую же линейную зависимость. Точность измерения перемещения пучка можно оценить исходя из точности измерений в эксперименте напряжения (0.2 мВ) и диаметра сфокусированного возбуждающего пучка света $\Delta = 0.17$ мкм. Поскольку при смещении пятна возбуждающего лазера на 50 мкм, изменение напряжения на внешнем сопротивлении составило ~ 400 мВ, то можно заключить, что данная структура позволяет регистрировать перемещения ~ 25 нм.

4. Заключение

Таким образом, экспериментально исследована величина фототока, индуцированного при локальном возбуждении оптическим пучком поверхности полупроводникового элемента в планарной структуре с двумя p - n переходами, образованными между базовой p -областью двухмерного дырочного газа и двумя n -областями двухмерного электронного газа. Показано, что величина фототока линейно зависит от координаты перемещения лазерного пучка. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами теоретических расчетов.

На основе двумерных биполярных структур можно создать компактный, безконтактный датчик перемещения, имеющий координатную чувствительность ~ 10 мВ/мкм.

Образцы с двумерным электронным газом были получены в Университете г. Бохума (Германия). Работа выполнена в рамках научного гранта РАУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Muscat, G.R. Nash, R.S. Smith. *Semicond. Sci. Technology*, **20**, 5 (2005).
2. D. Reuter, C. Werner, A.D. Wieck, S. Petrosyan. *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 162110 (2005).
3. C. Werner, D. Reuter, A.D. Wieck. *Physica E*, **32**, 508 (2006).
4. S. Cui, Y.C. Soh. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **57**, 2310 (2010).
5. J. Wu, Y. Chen, S. Gao, Y. Li, Z. Wu. *Applied Optics*, **54**, 8049 (2015).
6. М.С. Саакян, С.Г. Петросян. *Известия НАН Армении, Физика*, **43**, 168 (2007).

ՖՈՏՈՆՆՍԱՆՔԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՐԿՉՍՓ n - p - n ԿԱՌՈՒՑՎԱՅՔՈՒՄ ՍԿԱՆԱՎՈՐՎՈՂ ԼԱԶԵՐՍՅԻՆ ՄԱՆՐԱԴԻՏԱԿՈՎ

Ս.Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Ա.Մ. ԽԱՆԲԵԿՅԱՆ

Փորձնականորեն հետազոտված է ֆոտոհոսանքի առաջացումը 0.17 մկմ կիզակետված լուսային փնջով հարթ կառուցվածքով երկչափ p - n անցումներով կիսահաղորդչային մակերեսի տեղային զրգռելով, այսպես կոչված սկանավորող լազերային մանրադիտակային եղանակով: Կառուցվածքի բարձր զգայունությունը հնարավորություն է տալիս գրանցել տասնյակ նանոմետրների կարգի տեղափոխություններ:

STUDY OF PHOTOCURRENT IN THE TWO-DIMENSIONAL n - p - n STRUCTURE BY SCANNING LASER MICROSCOPE

S.G. PETROSYAN, A.M. KHANBEKYAN

The photocurrent induced under local excitation of the light beam focused up to 0.17 μm from the surface of semiconductor element in the planar structure with two p - n junctions, i. e., using the so-called scanning laser microscopy technique, was experimentally studied. The linear dependence of photocurrent on the coordinate of beam center is obtained. High sensitivity of the structure allows recording movements of the order of tens nanometers.