

УДК 548.0

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОТОКА, ИНДУЦИРОВАННОГО ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ В ПЛАНАРНЫХ ДВУМЕРНЫХ *n-p-n* СТРУКТУРАХ

С.Т. МУРАДЯН

Центр по сверхпроводимости и научному приборостроению, Ереванский
государственный университет, Армения

Российско-Армянский (Славянский) государственный университет, Ереван

(Поступила в редакцию 16 апреля 2010 г.)

Измерена величина индуцированного в двумерных *n-p-n* структурах фототока в зависимости от положения падающего на их поверхности фокусированного лазерного луча. Исследуемые образцы были получены из *p*-легированной GaAs/In_{0.11}Ga_{0.89}As/Al_{0.33}Ga_{0.67}As гетероструктуры путём локального перекомпенсационного легирования кремнием. Такие структуры обладают высокой фоточувствительностью, а величина индуцированного в них фототока меняется линейно с изменением положения падающего луча почти на всём промежутке между двумя *p-n* переходами. На основе двумерных *n-p-n* структур сконструирован датчик абсолютного положения и оценено пространственное разрешение такого координатно-чувствительного элемента.

Двумерные *p-n* переходы (т.е. переходы в плоскости, образованные вдоль линии соприкосновения двумерного дырочного газа (2МДГ) и двумерного электронного газа (2МЭГ)) обладают рядом интересных свойств. Например, ширина обеднённого слоя линейно зависит от обратного напряжения [1], а величина его ёмкости довольно мала (~20 нФ/мкм) и имеет слабую зависимость от приложенного напряжения [2-4], что позволяет создавать на основе таких структур быстродействующие элементы микроэлектроники. К тому же эти структуры имеют довольно большую поверхность и характеризуются высокой фоточувствительностью в области собственного поглощения. Величина и знак фототока, индуцированного фокусированным лазерным лучом в структурах, основанных на двумерных *p-n* переходах, проявляет сильную зависимость от положения луча [5,6], что позволяет использовать эти элементы и в качестве датчиков абсолютного положения или смещения. Таким образом, создание структур на основе двумерных *p-n* переходов и исследование их физических свойств является актуальной задачей современной оптоэлектроники.

В настоящей работе исследована зависимость величины индуцированного в двумерных *n-p-n* переходах фототока от положения падающего лазерного луча относительно расстояния до *p-n* переходов. На основе полученных результатов

сконструирован датчик абсолютного положения на основе двумерных $n-p-n$ структур и оценено пространственное разрешение такого координатно-чувствительного элемента. Для этой цели мы использовали структуры, описанные в работе [5]. Эти структуры были получены путём локального перекомпенсационного легирования фокусированным ионным пучком (ФИП-легирование) исходно p -модуляционно-легированной GaAs/In_{0.11}Ga_{0.89}As/Al_{0.33}Ga_{0.67}As гетероструктуры. Для получения гетероструктуры на тонкой пленке GaAs ($E_g = 1.43$ эВ) толщиной 650 нм методом молекулярно-лучевой эпитаксии выращивают 10 нм-овый слой In_{0.11}Ga_{0.89}As ($E_g = 1.26$ эВ), образующий квантовую яму. За ним следует 10 нм-овый ограничивающий барьерный слой Al_{0.33}Ga_{0.67}As ($E_g = 1.83$ эВ). После этого выращивается переходный слой, представляющий собой легированную углеродом (C) сверхрешётку с 16-ю периодами: 2 нм GaAs / 1 нм AlAs. Далее наращивают плёнку Al_{0.33}Ga_{0.67}As толщиной 117 нм, а затем покрывают 5 нм-овым защитным слоем GaAs (рис.1). Для получения $p-n$ перехода полученный образец локально перекомпенсируют с помощью ФИП легирования кремнием (Si).

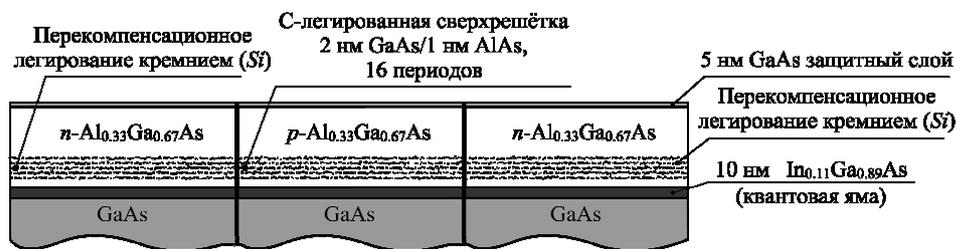


Рис.1. Схематическое изображение гетероструктуры с двумя $p-n$ переходами.

Исследованные двумерные $n-p-n$ структуры были получены с применением описанной выше технологии в университете Бохума [4]. В таких структурах генерированные светом электронно-дырочные пары разделяются поперечными контактными электрическими полями, создавая фототок. Величина генерированного фототока зависит от положения лазерного луча, так как из-за рекомбинационных потерь число разделённых электронно-дырочных пар зависит от расстояния точки генерации до областей поверхностного заряда двух $p-n$ переходов. Величина фототока максимальна, когда генерация происходит в области поверхностного заряда одного из $p-n$ переходов, где практически все генерированные пары участвуют в фототоке.

При использовании лазера с длиной волны 633 нм свет в основном поглощается в верхнем, широкозонном ограничивающем слое Al_{0.33}Ga_{0.67}As, вследствие чего в этом слое локально возбуждаются электронно-дырочные пары, которые начинают диффузионно расплываться во все стороны. Необходимо иметь в виду, что слой Al_{0.33}Ga_{0.67}As очень тонкий, его толщина меньше диффузионной длины электронно-дырочных пар и рекомбинационные потери при диффузии в

направлении распространения света практически отсутствуют. Поэтому они диффундируют к квантовой яме, достигая которой, захватываются в яму.

Иначе обстоит дело с поперечной диффузией неравновесных носителей заряда, поскольку поперечная ширина структуры (расстояние между двумя p - n переходами) в нашем эксперименте составляет ~ 80 мкм, что намного превосходит диффузионную длину электронно-дырочных пар в слое $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$. Вследствие этого, из-за рекомбинационных потерь генерированные пары не могут дать заметного вклада в фототок (особенно, когда световое пятно находится в центральной части p -области, где и наблюдается линейная зависимость фототока от положения падающего пучка). Поэтому вклад слоя $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$ в фототок n - p - n структуры практически отсутствует.

Захваченные в яме электронно-дырочные пары характеризуются большими подвижностями и диффузионными длинами, благодаря использованию принципа модуляционного легирования при изготовлении исследованных образцов. Легированные примеси находятся в тонком сверхрешёточном слое, который разделён от квантовой ямы слоем «спейсера». Благодаря этому, диффузионная длина электронно-дырочных пар в квантовой яме настолько велика, что неравновесные носители заряда после захвата в яму начинают двигаться к областям «поверхностного» заряда n - p и p - n переходов, разделяются поперечными контактными полями и дают вклад в общий фототок, при этом претерпевая малые рекомбинационные потери. В результате практически весь фототок формируется в слое квантовой ямы.

Так как в наших образцах имеются два обратно включённых p - n перехода, то результирующий фототок в цепи представляет собой разность фототоков, индуцированных в каждом из переходов.

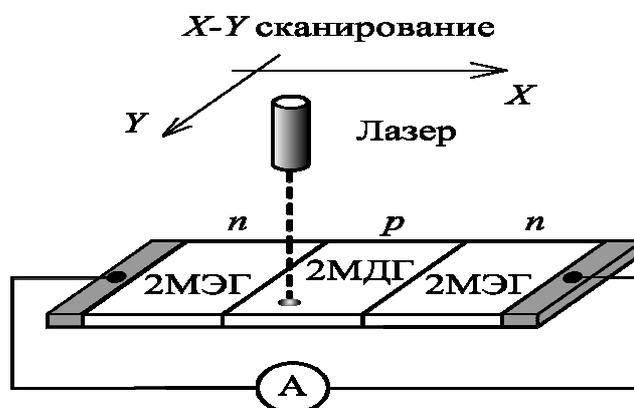


Рис.2. Схема измерения фототока, генерированного в двумерной n - p - n структуре.

Измерения проводились по схеме, приведённой на рис.2. Сканирование в горизонтальной плоскости (в плоскости поверхности образца) осуществлялось с помощью двухкоординатного столика на шаговых двигателях. Шаг столика по

обоим направлениям (“X”- и “Y”-сканирование) составлял 0.5 мкм. Образец крепился на этом столике, а перпендикулярно к его поверхности направлялся сфокусированный луч гелий-неонового лазера (длина волны 633 нм, диаметр пучка ~1.5 мкм, мощность пучка ~1 мВт). Фототок, индуцированный в замкнутой цепи, измерялся с помощью амперметра Keithley 617 (абсолютная чувствительность составляет 0.1 фА, а относительное разрешение – 10^{-4}).

На рис.3 приведена типичная кривая “X”-сканирования с шагом 1 мкм двумерной *n-p-n* структуры (направление сканирования перпендикулярно линиям *p-n* переходов). На этом рисунке горизонтальная ось показывает координату лазерного луча, а вертикальная – величину индуцированного фототока. Зарегистрированная зависимость фототока от положения центра генерации электронно-дырочных пар (вызванной поглощением света в квантовой яме и в окружающих барьерных слоях) совпадает с соответствующей зависимостью, рассчитанной теоретически в работе [6]. Координаты, соответствующие максимуму и минимуму индуцированного фототока, соответствуют положениям областей поверхностного заряда *p-n* переходов, расстояние между которыми для данного образца составляло 80 мкм. Как видно из рис.3, почти на всём промежутке между двумя *p-n* переходами величина фототока линейно зависит от координаты луча. Этот факт позволяет конструировать на основе таких двумерных *n-p-n* переходов датчики абсолютного положения, которые позволят определять не только величину, но и направление смещения. При соответствующей схеме падения лазерного луча (например, после отражения от плоской зеркальной поверхности) можно сконструировать также и датчик угла.

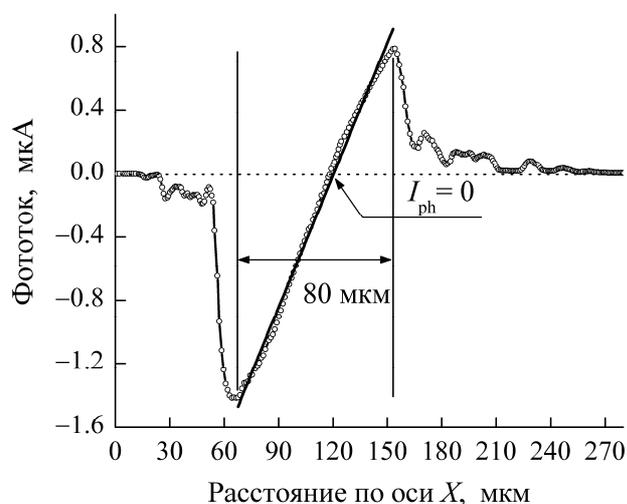


Рис.3. Зависимость величины фототока от координаты центра лазерного луча по направлению, перпендикулярному линиям *p-n* переходов. Сигнал отсутствует ($I_{ph} = 0$), когда луч находится в центре базовой *p*-области.

Из приведённой зависимости следует, что изменению координаты на 1 мкм соответствует изменение величины фототока на 28 нА (крутизна графика на

рис.3). Как показано в работе [5], крутизна этой зависимости увеличивается с уменьшением расстояния между двумя переходами. Учитывая, что собранная нами установка позволяет измерять токи величиной не менее 0.1 фА, изменение фототока на 28 нА – очень большой сигнал по сравнению с разрешением нашей измерительной аппаратуры. Однако, это вовсе не говорит о том, что мы можем ещё больше увеличить координатную чувствительность использованных нами *n-p-n* структур. Дело в том, что пространственное разрешение в наших экспериментах ограничивается не столько точностью измерения фототока, сколько размером пятна фокусированного лазерного луча на поверхности структуры. В случае использованного нами лазера с длиной волны 633 нм теоретический предел фокусировки порядка 1 мкм, что и было нами почти достигнуто. Полученное в настоящей работе пространственное разрешение (~1 мкм) можно несколько улучшить, если вместо красного луча использовать синий, который можно сфокусировать уже до 0.5 мкм.

Наблюдаемая асимметричность максимума и минимума индуцированного фототока (рис.3) имеет технологическую природу, а неровности кривой после ухода луча из базы структуры в квазинейтральные участки *n*-областей обусловлены попаданием луча на участки образца, где были насажены омические контакты. Прямые участки в самом начале и в конце измеренной кривой представляют собой сигналы из областей, находящихся довольно далеко от *p-n* переходов и не покрытых контактами.

Нами проведено также и беглое 2D-сканирование поверхности исследованных образцов (в плоскости поверхности образцов – “X”/“Y” сканирование) с

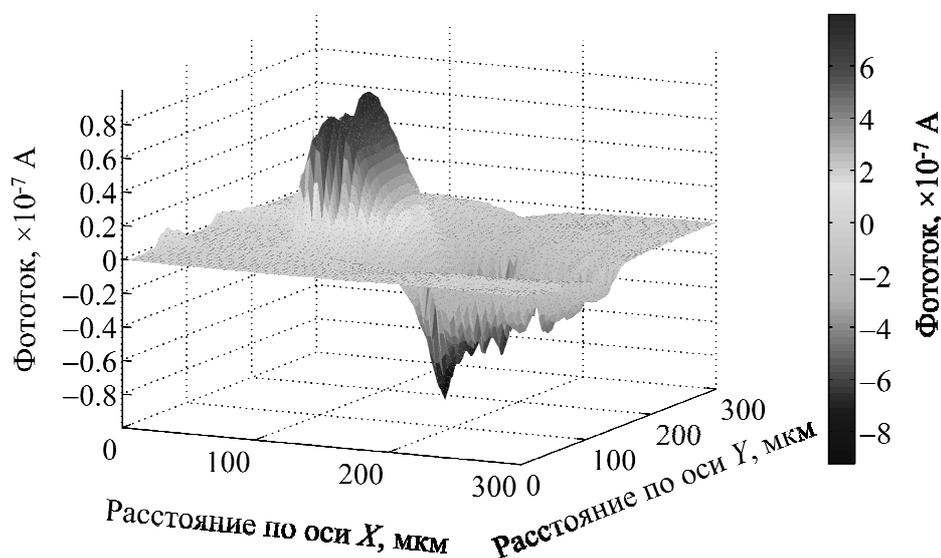


Рис.4. Зависимость величины фототока от координат центра лазерного луча при двумерном сканировании.

шагом сканирования по обоим направлениям, равным 3 мкм. Типичная трёхмерная картина, отражающая результаты этих экспериментов, приведена на рис.4.

В заключение отметим, что планарные гетероструктуры с квантовой ямой, основанные на двумерных $p-n$ переходах, обладают многими уникальными свойствами, которые открывают новые возможности для их применения в опто- и микроэлектронике, в частности, для создания быстродействующих элементов. В данной работе мы изучили возможности создания на их основе датчиков абсолютного положения нового класса путём исследования зависимости индуцированного в двумерной $n-p-n$ структуре фототока от положения предельно сфокусированного лазерного луча. Исходя из полученных данных, можно утверждать, что такие датчики уже сегодня демонстрируют пространственное разрешение порядка одного микрона с общим ходом в диапазоне ~ 100 мкм.

Автор работы признателен своим научным руководителям: С.Г. Петросяну – за постановку задачи и С.Г. Геворгяну – за помощь в разработке и создании измерительной установки.

Автор благодарен также сотрудникам лаборатории проф. А.Д. Вика из Рурского университета г. Бохума (Германия) за любезное предоставление уникальных образцов, выращенных в молекулярно-лучевой установке со встроенным ионным имплантатором.

ЛИТЕРАТУРА

1. **D.Reuter, C.Werner, A.D.Wieck, S.Petrosyan.** Appl. Phys. Lett., **86**, 162110 (2005).
2. **C.Wiemann, M.Versen, A.D.Wieck.** J. Vac. Sci. Technol. B, **16**, 2567 (1998).
3. **A.S.Achoyan, A.E.Yesayan, E.M.Kazaryan, S.G.Petrosyan.** Semiconductors, **36**, 903 (2002).
4. **D.Reuter, C.Werner, C.Riedesel, A.D.Wieck, D.Schuster, W.Hansen.** Physica E, **22**, 725 (2004).
5. **C.Werner, D.Reuter, A.D.Wieck.** Physica E, **32**, 508 (2006).
6. **М.С.Саакян, С.Г.Петросян.** Изв. НАН Армении, Физика, **42**, 168 (2007).

INVESTIGATION OF LASER BEAM-INDUCED PHOTOCURRENT IN PLANAR TWO-DIMENSIONAL $n-p-n$ STRUCTURES

S.T. MURADYAN

Dependence of the magnitude of induced photocurrent on the position of the focused laser beam inclined on the surface was measured in two-dimensional $n-p-n$ structures. Investigated samples were fabricated from p -doped GaAs/In_{0.11}Ga_{0.89}As/Al_{0.33}Ga_{0.67}As heterostructure by the local overcompensation doping with silicon. These structures show a high photosensitivity: the magnitude of the photocurrent induced in such devices is changing linearly with the change in the position of the inclined beam almost in the whole space between two $p-n$ junctions. The absolute position sensor, based on such two-dimensional $n-p-n$ structures, was created. The spatial resolution of this coordinate-sensitive element was estimated.