

Е.Ф. Венгер, И. Готовы*, Л.В. Шеховцов

ЛАТЕРАЛЬНАЯ ФОТОЭДС В НЕОДНОРОДНОМ КОНТАКТЕ ШОТТКИ

Исследованы спектральные характеристики латеральной фотоЭДС, которая генерируется модулированным монохроматическим светом в образцах контакта Шоттки NbN—GaAs с содержанием азота в пленке нитрида ниобия 5 %. Для образцов, отожженных при $T = 900$ °С, характерно изменение знака фотоЭДС в области края поглощения GaAs. Кривые распределения ЭДС знакопеременные и имеют нелинейный характер. Определено, что отжиг при $T = 950$ °С приводит к увеличению относительной неоднородности толщины области истощения и отсутствию изменения знака спектральной характеристики фотоЭДС. При этом сохраняется значительное влияние неоднородности изгиба зон в области истощения гетеросистемы на характер распределения латеральной ЭДС.

Ключевые слова: латеральная фотоЭДС, контакт Шоттки, спектральная характеристика, неоднородность.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования и анализ особенностей спектральных характеристик поперечной фотоЭДС в полупроводниковых гетеросистемах, таких как Ge—GaAs, TiB₂—GaAs, NbN—GaAs, позволили построить реальную зонную модель этих структур [1, 2].

Данная работа является, по сути, продолжением работы [2]. Здесь представлены результаты исследования контакта Шоттки с помощью той же фотоэлектрической методики. Однако теперь интерпретация результатов измерений проведена с учетом неоднородности легирования GaAs и флуктуаций изгиба зон у контакта NbN—GaAs [3—5].

Цель экспериментов — выяснение влияния термического отжига на свойства контакта Шоттки. Ниже приведены результаты исследований, проведенных на образцах контактов Шоттки NbN—GaAs с истощающим изгибом зон на границе раздела. На основе интерпретации изменения вида спектральных характеристик фотоЭДС предложены возможные механизмы протекания фототоков в образце NbN—GaAs с неоднородным изгибом зон в области истощения (ОИ).

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ПАРАМЕТРЫ ОБРАЗЦОВ

В исследованных образцах пленка NbN получена распылением в смеси азота и аргона при концентрации азота 5 % на подложку GaAs *n*-типа с концентрацией темновых носителей заряда $n_0 = 5 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Отжиг образцов преследовал несколько целей. Это прежде всего исследование термической стабильности структуры, а также изменения высоты барьера и фактора идеальности контакта Шоттки [6]. Толщина пленки составляет 100—150 нм, подложки — 200 мкм. Длина и ширина образцов — 10—12 мм. Для исследований были отобраны образцы, подвергнутые отжигу при температуре 900 и 950 °С в течение 10 с.

Возбуждающее монохроматическое излучение из выходной щели монохроматора МДР-23 направлялось по нормали на поверхность образцов со стороны подложки GaAs и пленки NbN, ширина светового пучка составляла 2 мм.

Исследования спектральных характеристик осуществлялись в условиях постоянства количества падающих на образец квантов света, которое составляло $8 \cdot 10^{14}$ фотон/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$). Измерительные контакты и прилегающие к ним части (длиной $\sim 2\text{--}3$ мм) образцов закрывались непрозрачными полосками черной бумаги. Длина открытой части образца при измерениях составляла 5 мм.

Частота модуляции возбуждающего монохроматического излучения — 540 Гц. Исследования проводились при комнатной температуре.

Измерение сигнала фотоЭДС производилось в направлении, параллельном границе раздела между пленкой и подложкой. Для исследования распределения фотоЭДС вдоль образца использовался движущийся со скоростью 0,025 мм/с световой зонд шириной 0,3 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характерные особенности распределения фотоЭДС в контакте Шоттки, представленные в работе [2], указывают на преимущественно латеральную ее природу. Однако аналогичные кривые, измеренные для образцов с концентрацией азота 5 % и отожженных при $T = 900$ °С и 950 °С, имеют выраженные различия (рис. 1). Так, на кривых 1 и 2 (отжиг при $T = 900$ °С) отсутствуют особенности, которые соответствуют свойствам латеральной ЭДС, кривые 3 и 4 (отжиг при $T = 950$ °С) имеют симметричную форму относительно центра открытой части образца и изменяют свой знак, но при этом наблюдаются выраженные максимумы по краям. Распределения фотоЭДС 1 и 3 измерены при освещении образцов со стороны GaAs. Кривые 2 и 4 соответствуют освещению со стороны пленки NbN. Измерения проводились при длине возбуждающего монохроматического света $\lambda = 0,88$ мкм ($h\nu = 1,41$ эВ).

Здесь необходимо сделать важное замечание, связанное с методикой проведенных измерений. Смещение относительно центра или отсутствие точки изменения знака распределения фотоЭДС на рис. 1 может быть обусловлено несимметричным положением открытой части образца относительно измерительных контактов. Но аналогичные опыты, проведенные при открытых, незатененных от света контактах, показали, что на кривых распределения ЭДС появились дополнительные максимумы. Связаны они с вентильной ЭДС, которая и должна генерироваться в образцах при положении светового зонда на расстоянии от контактов, равном или меньшем длины диффузионного смещения неравновесных электронно-дырочных пар. При этом остальная часть распределения ЭДС соответствовала кривым, измеренным при закрытых от света контактах.

Форма кривых 1—4 (см. рис. 1) показывает, что для исследуемых образцов проводить измерения спектральных характеристик фотоЭДС в условиях, когда световой зонд расположен вблизи края открытой части образца проблематично, так как амплитуда ЭДС в этом случае близка к минимальной. Поэтому, в отличие от исследований спектральных характеристик, выполненных в работе [2], представленные ниже аналогичные измерения, осуществлялись в условиях, при которых световой зонд располагался вблизи максимальных значений амплитуд кривых распределения фотоЭДС (см. рис. 1).

Типичные спектральные характеристики поперечной фотоЭДС, измеренные при освещении образцов со стороны GaAs, представлены на рис. 2 (кривая 1 — образец отожжен при $T = 900$ °С; кривая 2 — $T = 950$ °С).

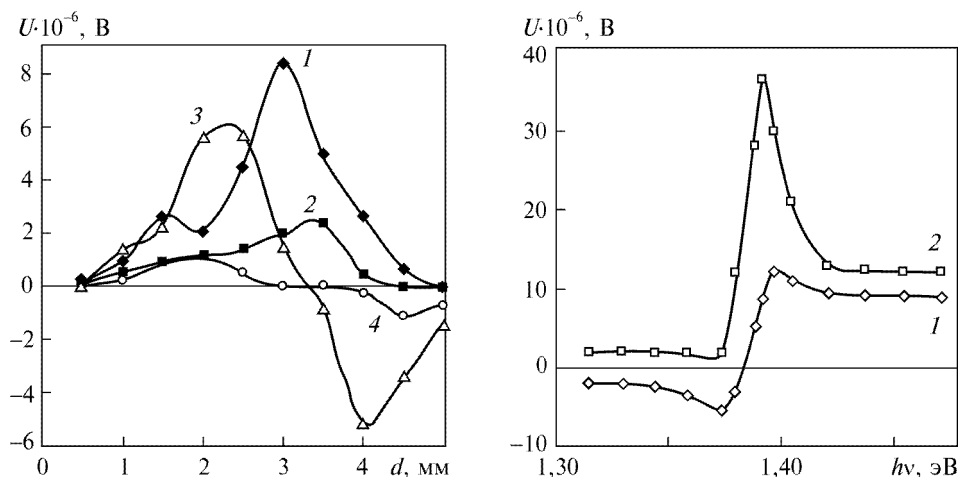


Рис. 1. Распределение фотоЭДС в образце NbN—GaAs при $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1, 2) и $T = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ (3, 4)

Рис. 2. Спектральные характеристики поперечной фотоЭДС, измеренные при разной температуре отжига структуры NbN—GaAs, $^{\circ}\text{C}$: 1 — 900, 2 — 950

Нужно отметить, что изменение вида спектральных характеристик для разных образцов гетеросистемы NbN—GaAs происходит при различной температуре отжига в интервале $850\text{--}950\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зависимости от концентрации азота в пленке NbN, которая изменяется в пределах $2\text{--}20\%$. Поэтому можно ожидать, что процессы формирования контакта Шоттки в указанных технологических условиях близки по своему характеру, однако, к особенностям, обусловленным конкретной концентрацией азота и температурой отжига.

Отобранные для анализа спектральные характеристики, которые представлены на рис. 2, являются типичными для образцов контакта Шоттки NbN—GaAs с содержанием азота в пленке нитрида ниобия от 2 до 20% , отожженных в диапазоне температур $850\text{--}950\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для интерпретации и построения модели механизмов протекания и взаимодействия фототоков в образцах используют конкретные кривые, соответствующие контакту NbN—GaAs с содержанием азота в пленке 5% .

Полному анализу и обобщению результатов, полученных для указанных диапазонов концентрации азота в пленке нитрида ниобия и температурного отжига гетеросистемы, будет посвящено отдельное сообщение.

Как видно из рис. 2, спектральные характеристики имеют такие особенности:

а) кривая 1 изменяет знак в области длины волны $\lambda = 0,88\text{--}0,89\text{ }\mu\text{m}$ ($h\nu = 1,41\text{--}1,39\text{ эВ}$), при этом максимальная амплитуда ЭДС обоих знаков имеет примерно одинаковую величину;

б) кривая 2 имеет один и тот же знак во всем измеряемом диапазоне длин волн, максимум расположен вблизи $\lambda = 0,89\text{ }\mu\text{m}$ ($h\nu = 1,39\text{ эВ}$) и амплитуда ЭДС плавно уменьшается в обе стороны от максимума.

Интерпретацию полученных спектральных характеристик можно дать, предполагая существование в полупроводниковой структуре неоднородности легирования полупроводника и изгиба зон вдоль границы раздела NbN—GaAs [3—5]. Вид распределения фотоЭДС, измеренный с помощью движущегося светового зонда (см. рис. 1), это подтверждает.

Если напыление пленки NbN и отжиг при $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ повлияли на распределение легирующей примеси в GaAs, то между флуктуацией легирования и величиной изгиба зон должна наблюдаться известная кор-

реляция: неоднородности легирования объема будет соответствовать неоднородность истошающего изгиба зон на границе раздела GaAs и пленки NbN [3, 5]. Кроме того, на величину таких флуктуаций влияет неоднородность примесных поверхностных состояний [3].

Таким образом, генерируемая латеральная фотоЭДС будет испытывать влияние неоднородности истошающего изгиба зон в области потенциального барьера контакта Шоттки (см. рис. 1). Градиент потенциала, который существует при этом с обеих сторон зонда возбуждающего света, является дополнительным тянущим или противодействующим электрическим полем, действующим на пространственно разделенные барьером неравновесные электроны и дырки, которые растекаются соответственно в квазинейтральной области GaAs и в ОИ. Понятно, что вид кривых распределения фотоЭДС при этом изменится. Кривые 3 и 4 (см. рис. 1) сохраняют один из основных признаков латеральной ЭДС — изменение знака вблизи середины (относительно контактов) образца, однако неоднородности потенциального барьера контакта Шоттки оказывают существенное влияние. На кривых 1 и 2 характерные особенности латеральной ЭДС — линейность распределения и изменение знака ЭДС — вообще не наблюдаются.

Если образец структуры NbN—GaAs освещается со стороны GaAs монохроматическим светом длиной волны $\lambda = 0,88$ мкм (что соответствует коэффициенту поглощения света в GaAs $\alpha = 800$ см⁻¹ [7] и эффективной глубине поглощения 12 мкм), то неравновесные носители заряда генерируются вблизи ОИ и движутся в поле градиента изгиба зон. На опыте знак фотоЭДС может определяться этим градиентом, в зависимости от его значения и направления.

Изменение знака на спектральной характеристике поперечной фотоЭДС в структуре NbN—GaAs, отожженной при $T = 900$ °С (см. рис. 2, кривая 1), означает наличие конкуренции между каналами растекания неравновесных электронов и дырок соответственно в нейтральной области GaAs и в ОИ контакта [2].

Уменьшение потенциального барьера в гетеросистеме, происходящее при отжиге [8], приводит к относительно увеличению его неоднородности [3], что хорошо видно из формы кривых 3 и 4 (см. рис. 1). В свою очередь изменяется вид спектральной характеристики ЭДС. Отжиг при температуре 950 °С обуславливает изменение формы спектральной характеристики (см. рис. 2, кривая 2). Теперь ЭДС имеет одинаковый знак во всем исследуемом диапазоне длин волн возбуждающего света, причем амплитуда ЭДС вблизи края поглощения GaAs ($\lambda = 0,89$ мкм, $h\nu = 1,39$ эВ) больше, чем в области $\lambda = 0,84$ — $0,87$ мкм.

Изменение формы спектральной характеристики при увеличении температуры отжига может означать, что при $T = 950$ °С происходит не только перестройка поверхностных состояний на границе раздела NbN—GaAs, но и перераспределение заряженных доноров в области истошения, в результате этого уменьшается изгиб зон и возрастает его относительная неоднородность [3, 8]. При этом происходит увеличение проводимости слоя на границе металл—полупроводник [9]. Вследствие этого преобладает влияние на амплитуду латеральной ЭДС фототока, протекающего в ОИ вдоль границы раздела гетеросистемы NbN—GaAs. Очевидно, что все эти процессы играют решающую роль в изменении формы спектральной характеристики ЭДС (см. рис. 2).

Длинноволновая часть спектральной характеристики фотоЭДС при $\lambda > 0,90$ мкм ($h\nu < 1,38$ эВ) связана с генерацией носителей заряда с заполненных поверхностных уровней, расположенных вблизи валентной зоны GaAs ниже уровня Ферми [10].

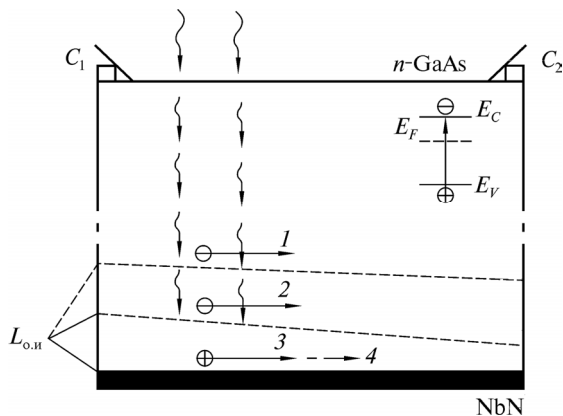


Рис. 3. Механизм генерации латеральной фотоЭДС в образце структуры NbN—GaAs: C_1 , C_2 — измерительные контакты; E_C , E_V , E_F — соответственно дно зоны проводимости, потолок валентной зоны, уровень Ферми GaAs; $L_{о.и}$ — область истощения; 1, 2 — потоки неравновесных электронов в нейтральной области GaAs; 3, 4 — потоки неравновесных дырок в переходном слое

Относительно интерпретации результатов измерений следует сделать еще одно важное замечание. В работе [11] анализ механизма возникновения латеральной ЭДС проводился в предположении, что толщина слоя полупроводника со стороны падающего света меньше длины диффузионного смещения неравновесных носителей заряда. При этом амплитуда и знак латеральной ЭДС должны зависеть от положения освещаемой части образца относительно измерительных контактов.

Понятно, что в этом случае изменение толщины такого слоя вдоль границы раздела можно не учитывать. Если толщина полупроводникового слоя с освещаемой стороны значительно больше длины диффузионного смещения неравновесных носителей, то латеральная ЭДС будет генерироваться вблизи ОИ только при малых коэффициентах поглощения. Следовательно, для образцов NbN—GaAs с толщиной подложки 200 мкм и длиной диффузии неравновесных носителей $\sim (1-5)$ мкм заметный вклад от латеральной ЭДС в суммарный сигнал можно ожидать при энергии квантов света, близких к краю поглощения GaAs.

Важный фактор для генерации латеральной ЭДС в образцах контакта Шоттки с неоднородной толщиной области истощения — это величина флуктуаций изгиба зон ОИ. Из исследований и расчетов получены значения этих флуктуаций: $\sim 20-50$ мэВ при комнатной температуре [4, 5].

Вместе с тем величина неоднородностей коррелирует с дискретным распределением примеси в области контакта гетеросистемы. Энергетическая амплитуда флуктуаций может не являться препятствием для движения неравновесных носителей заряда, однако пространственное распределение примесей создает градиент потенциала.

В рамках представлений о существовании градиента изгиба зон в полупроводниковых структурах можно объяснить сложную форму кривых распределения фотоЭДС (рис. 3). В результате отжига при $T = 900$ °С, вклад в суммарный сигнал дают потоки неравновесных носителей заряда в нейтральной области GaAs и ОИ гетеросистемы (рис. 3, стрелки 1 и 3). Одинаковая длина стрелок на рисунке указывает на конкурирующее влияние этих потоков на вид спектральной характеристики ЭДС.

Отжиг структуры при $T = 950$ °С приводит к уменьшению изгиба зон и увеличению его относительной неоднородности (см. рис. 1, кривые 1 и 3) [6, 8]. В этом случае определяющий фактор для амплитуды и формы спектральной характеристики ЭДС — возрастание проводимости переходного слоя в ОИ гетеросистемы по сравнению с нейтральной областью (см. рис. 3, это условно обозначено разной длиной стрелок 2 и 4).

Таким образом, при наличии неоднородного изгиба зон в контакте Шоттки форма спектральной характеристики фотоЭДС определяется

преимущественно соотношением между проводимостью нейтральной области GaAs и ОИ. Кроме того, такая неоднородность влияет на амплитуду измеряемой ЭДС.

Этот фактор оказывает определяющее влияние на вид кривых распределения ЭДС (см. рис. 1). Следовательно, их форма может быть характеристикой качества контакта Шоттки, что является важным для диагностики приборов микроэлектроники.

ВЫВОДЫ

Изложенные результаты позволяют сделать следующие выводы.

На границе раздела структуры NbN—GaAs существует неоднородный изгиб зон, который формируется при напылении пленки NbN и остается таковым при последующем отжиге при $T = 900$ °С. Для образцов этих структур характерна спектральная характеристика поперечной фотоЭДС с изменением знака.

Отжиг структуры NbN—GaAs при $T = 950$ °С приводит к уменьшению изгиба зон и возрастанию его относительной неоднородности. При этом происходит увеличение проводимости переходного полупроводникового слоя, на что указывает изменение формы спектральной характеристики, а именно: фотоЭДС не изменяет свой знак в исследованном спектральном диапазоне.

Таким образом, особенности спектральных характеристик латеральной фотоЭДС объясняются взаимодействием фототоков, протекающих в объеме GaAs и в области истощения контакта Шоттки NbN—GaAs.

E.F. Venger, I. Hotovy, L.V. Shekhovtsov

LATERAL PHOTO-EMF IN A NONUNIFORM SCHOTTKY CONTACT

Spectral characteristics of lateral photo-emf produced by modulated monochromatic illumination in NbN—GaAs Schottky contacts (with 5 % nitrogen content in the niobium nitride film) have been studied. For the samples annealed at $T = 900$ °С, the photo-emf changes its sign near the GaAs absorption edge. The photo-emf distribution curves are alternating and nonlinear. It was found that thermal annealing at $T = 950$ °С results in an increase of relative nonuniformity of the depletion region thickness, while the sign of the photo-emf spectral curve does not change. In this case, considerable effect of band bending nonuniformity in the depletion region of the heterosystem under investigation on the character of lateral photo-emf distribution is retained.

Keywords: lateral photo-emf, Schottky contact, spectral characteristic, nonuniformity.

1. Шеховцов Л.В., Саченко А.В., Шварц Ю.М. Поперечная фотоЭДС в гетероэпитаксиальной структуре // ФТП. — 1995. — **29**, № 3. — С. 566—573.
2. Венгер Е.Ф., Хотовы И., Шеховцов Л.В. Латеральная фотоЭДС в контакте Шоттки // ОПТ. — Киев: Наук. думка, 2010. — Вып. 45. — С. 100—108.
3. Бондаренко В.Б., Кузьмин М.В., Кораблев В.В. Анализ естественных неоднородностей потенциала у поверхности примесного пролупроводника // ФТП. — 2001. — **35**, № 8. — С. 964—968.
4. Естественные неоднородности высоты барьера Шоттки / В.Б. Бондаренко, Ю.А. Кудинов, С.Г. Ершов и др. // Там же. — 1998. — **32**, № 5. — С. 554—556.
5. Palm H., Arhes M., Schulz M. Fluctuations of the Au—Si (100) Schottky Barrier Height // Phys. Rev. Lett. — 1993. — **71**, N 14. — P. 2224—2227.
6. Hotovy I., Brcka J., Huran J. Investigation of reactively sputtered NbN films // Fizika A. — 1995. — **4**, N 2. — P. 337—342.
7. Sturge M.O. Optical absorption of gallium arsenide between 0,6 and 2,74 eV // Phys. Rev. — 1962. — **12**, N 3. — P. 768—773.
8. Связь электронных свойств границы раздела фаз с межфазным взаимодействием в

- гетероструктурах NbN—GaAs / А.А. Беляев, И. Готовы, Е.Ф. Венгер и др. // ЖТФ. — 1998. — **68**, № 1. — С. 63—66.
9. *Гольдберг Ю.А., Поссе Е.А.* Образование омического контакта в процессе непрерывного нагревания диодов Шоттки на основе GaAs и GaP // ФТП. — 1998. — **2**, № 2. — С. 200—202.
10. *Свойства* барьеров Шоттки Nb/*n*-GaAs и NbN/*n*-GaAs / И.А. Ахинько, Е.Я. Гольдберг, А.Т. Григорьев и др. // Электрон. техника. Микроэлектроника. — 1990. — Вып. 1(135). — С. 35—37.
11. *Wallmark J.T.* A new semiconductor photocell using lateral photoeffect // Proc. IRE. — 1957. — **45**, N 4. — P. 474—483.

Институт физики полупроводников
им. В.Е. Лашкарева
НАН Украины
Проспект Науки, 41
03028 Киев

Принято 10.03.2011

*Словацкий технический университет
Братислава, Словакия