

К ВОПРОСУ О ПРИРОДЕ РАССЕЯНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК ВИСМУТА

Г.А. Ухлинов, В.П. Гаранин

В работе приведены результаты исследований размерного эффекта в электропроводности и термоэдс пленок висмута, поверхность которых покрыта тонким слоем теллура или свинца. Установлена определяющая роль зарядового состояния поверхности пленок висмута на ее рассеивающую способность по отношению к носителям заряда.

При соизмеримости размеров образцов с длиной свободного пробега носителей заряда становится существенным их рассеяние на геометрических поверхностях. Это приводит к размерному эффекту в кинетичес-

ких коэффициентах, наблюдаемому, например, в тонких пленках [1]. Степень проявления размерного эффекта зависит от рассеивающей способности поверхности по отношению к носителям заряда. В теории размерного эффекта Фукса [2] она характеризуется феноменологическим параметром зеркальности (равном нулю в случае полностью диффузного рассеяния и единице – зеркального отражения). Обычно характер рассеяния носителей заряда на поверхности связывают с ее геометрическим рельефом (шероховатостью) [3, 4]. Однако эта точка зрения не объясняет заметных различий в характере поверхностного рассеяния носителей заряда разных знаков, наблюдавшихся в висмуте и сурьме [5, 6]. Так, например, в работе [5] методом поперечной магнитной фокусировки установлено, что параметр зеркальности поверхности сурьмы по отношению к электронам равен 0,8, по отношению к дыркам – 0,1. Эти результаты можно объяснить тем, что на поверхности имеется заряд (захваченный, например, поверхностными состояниями), электрическое поле которого воздействует на носители заряда при их движении вблизи поверхности. Если поверхность заряжена отрицательно, то электроны отражаются от потенциального барьера, созданного зарядом, не достигая геометрической поверхности образца. В то же время отрицательный заряд не только не препятствует долетанию дырок до поверхности, но даже отклоняет их в сторону поверхности, на которой они рассеиваются диффузно. Таким образом, наличие отрицательного заряда на поверхности как бы зеркализует ее по отношению к электронам, но увеличивает рассеяние дырок на поверхности.

Влияние заряда на поверхности и вызванного им изгиба зон в приповерхностном слое на размерный эффект в электропроводности полуметаллов типа висмута и сурьмы рассмотрено в работе [7]. Эта теория объясняет ряд особенностей размерного эффекта в электропроводности (например, его насыщение), наблюдавшихся в висмуте [8 – 10]. Однако непосредственных и контролируемых исследований влияния зарядового состояния поверхности и обусловленного им изгиба зон на размерные эффекты в биполярных материалах не проводилось.

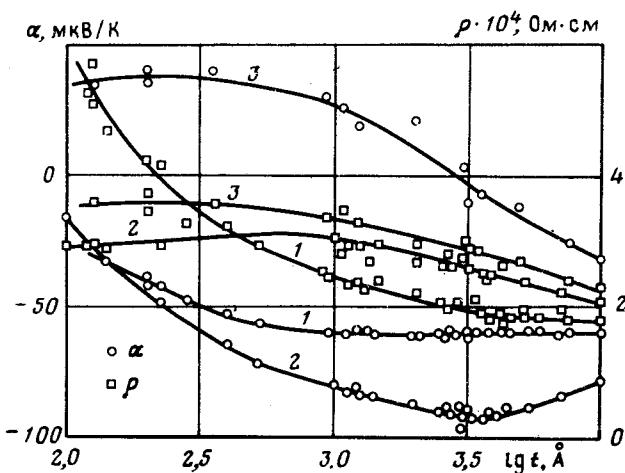
Одним из методов создания контролируемого изгиба зон вблизи поверхности образца является нанесение на его поверхность слоя вещества с отличающейся работой выхода выхода электронов (метод наложения поперечного электрического поля для висмута и сурьмы не применим [11]). Важно, чтобы покрытие имело идеальный физический контакт с поверхностью образца. В этом случае изгиб зон в приповерхностном слое можно рассчитать по теории контактных явлений [12].

Наиболее заметно характер поверхностного рассеяния носителей заряда проявляется в электропроводности образцов. Однако, по данным об электропроводности трудно сделать вывод о характере рассеяния каждой группы носителей заряда в отдельности. Об этом можно судить по изменению величины и знаку коэффициента термоэдс, так как его электронная и дырочная компоненты складываются алгебраически с коэффициентами пропорциональности, равными парциальным проводимостям.

В настоящей работе исследованы электропроводность и коэффициент термоэдс пленок висмута, поверхность которых модифицирована тонкими слоями теллура и свинца. Выбор этих материалов в качестве мо-

дификаторов обусловлен тем, что работы выхода электронов из теллура и свинца соответственно больше (4,73 эВ) и меньше (4,0 эВ) работы выхода из висмута (4,4 эВ) [13]. Если предположить, что это соотношение работ выхода сохраняется и для пленок, то на поверхности пленок висмута при модифицировании их теллуром должен возникнуть отрицательный заряд (изгиб зон вверх) и положительный (изгиб зон вниз) – свинец.

Образцы для исследования получались путем конденсации из паровой фазы при комнатной температуре в вакууме 10^{-6} мм рт. ст. Сначала на подложку из слюды наносилась пленка модифицирующего материала, затем конденсировалась пленка висмута заданной толщины, которая снова покрывалась пленкой модифицирующего материала такой же толщины, что и подслой. Одновременно с трехслойными образцами ("сэндвичами") получались и "свидетели" пленок висмута и модифицирующих элементов. Скорость конденсации теллура и свинца была $5 - 7 \text{ \AA/сек}$, висмута – 50 \AA/сек . Толщина пленок висмута оценивалась по известным скорости и времени их осаждения. Измерение электросопротивления производилось четырехзондовым методом. Толщина подслоя и покрытия составляла $30 - 50 \text{ \AA}$, их суммарное электросопротивление – $10^6 - 10^7 \text{ Ом}$.



Зависимость коэффициента термоэдс (α) и удельного электросопротивления (ρ) пленок висмута на слюде (1) и трехслойных образцов теллур – висмут – теллур (2) и свинец – висмут – свинец (3)

Электронографические исследования тонкослойных "сэндвичей" висмут – теллур ($200 + 200 \text{ \AA}$) показали, что взаимодействие с образованием промежуточных соединений висмута и теллура не происходит. Дифрактометрическими исследованиями установлено, что образцы являлись поликристаллическими с практически хаотической ориентацией зерен.

Зависимость удельного сопротивления и коэффициента термоэдс трехслойных "сэндвичей" теллур – висмут – теллур и свинец – висмут – свинец, а также пленок висмута на слюде (их "свидетелей") от толщины при комнатной температуре показана на рисунке. Эти зависимости для пленок висмута на слюде носят обычно наблюдаемый характер. Однако, для трехслойных "сэндвичей" размерный эффект в электросопротивлении отсутствует, даже проявляется некоторая тенденция к

снижению удельного электросопротивления в области малых толщин. Зависимости удельного электросопротивления трехслойных "сэндвичей" свинец - висмут - свинец и теллур - висмут - теллур подобны, но удельное электросопротивление последних всегда больше. Более заметные отличия эти образцы проявляют в значении их коэффициентов термоэдс. Коэффициент термоэдс образцов теллур - висмут - теллур является отрицательным и заметно превосходит по абсолютной величине коэффициент термоэдс пленок висмута, достигая максимальных значений 90 - 92 мкВ/К при толщине образца 2000 - 3000 Å (это, кстати, свидетельствует о том, что диффузия теллура в висмуте не имеет места в условиях приготовления образцов, так как легирование висмута теллуром снижает коэффициент термоэдс по абсолютной величине [14]). С изменением толщины образцов он изменяется более резко, чем для пленок висмута. Коэффициент термоэдс образцов свинец - висмут - свинец при малых толщинах положителен (40 мкВ/К), начиная с толщины 1000 Å снижается, инвертирует свой знак при толщине 3000 Å, а затем медленно возрастает в сторону отрицательных значений.

Полученные результаты свидетельствуют о существенности влияния поля контактной разности потенциалов и его направления на вероятность столкновений носителей заряда с поверхностью. В образцах теллур - висмут - теллур поле контактной разности потенциалов искривляет траекторию движения электронов в сторону от поверхности, дырок - к поверхности. В результате более интенсивного поверхностного рассеяния дырок их подвижность снижается более значительно, чем электронов, и тем больше, чем тоньше пленки висмута. Можно сказать, что в тонких пленках висмута, поверхность которых модифицирована теллуром, электроперенос в основном осуществляется электронами в условиях их зеркального отражения от поверхности, а дырочная проводимость оказывается значительно подавленной. Обратная картина будет характерна для образцов свинец - висмут - свинец. Знак термоэдс этих образцов указывает на преимущественно дырочный тип проводимости до толщины 3000 Å. Поскольку объемная подвижность дырок меньше, чем электронов, то удельное электросопротивление образцов свинец - висмут - свинец больше, чем образцов теллур - висмут - теллур. В "сэндвичах" при малой толщине пленок висмута может проявляться и влияние обогащения или истощения носителями заряда того или другого знака приповерхностных слоев. Этим можно объяснить некоторое снижение удельного электросопротивления и коэффициента термоэдс образцов. Однако, в целом наблюдаемые особенности имеют размерный масштаб соизмеримый с длиной свободного пробега носителей заряда (2000 - 3000 Å), чем с глубиной слоя пространственного заряда (300 Å) [11], т.е. в основном связаны с влиянием зарядового состояния поверхности на эффективную длину свободного пробега, а не на их концентрацию.

Поступила в редакцию
14 апреля 1978 г.
После переработки
30 июня 1978 г.

Московский
институт электронной техники

Литература

- [1] К.Л.Чопра. Электрические явления в тонких пленках. М., изд. Мир, 1972, стр.435
 - [2] K.Fuchs. Proc. Cambr. Phil. Soc. pt.I, **34**, 100, 1938.
 - [3] Дж.Займан. Электроны и фононы. М., ИИЛ, 1962, стр.484
 - [4] S.B.Soffer. J. Appl. Phys. **38**, 1710, 1967.
 - [5] В.С.Цой, И.И.Разгонов. Письма в ЖЭТФ, **23**, 107, 1976.
 - [6] В.С.Цой. ЖЭТФ, **68**, 1849, 1975.
 - [7] В.Я.Кравченко, Э.И.Рашба. ЖЭТФ, **56**, 1713, 1969 .
 - [8] A.N.Friedman, S.H.Koenig. IBM Res. Develop, **4**, 158, 1960.
 - [9] Ю.Ф.Комник, Е.И.Бухштаб. ЖЭТФ, **54**, 63, 1968.
 - [10] Ю.Ф.Комник, Е.И.Бухташб, Ю.В.Никитин, В.В.Андреевский. ЖЭТФ, **60**, 669, 1971.
 - [11] Ю.Ф.Огрин, В.Н.Луцкий, М.И.Елинсон. ФТТ, **9**, 323, 1967.
 - [12] В.И.Стриха. Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки, М., изд. Мир, 1972, стр.435.
 - [13] В.С.Фоменко, И.А.Подчерняева. Эмиссионные и адсорбционные свойства веществ и материалов. М., Атомиздат, стр.320, 1975.
 - [14] Г.А.Иванов, А.Р.Регель. ЖТФ, **25**, 49, 1955.
-