

Влияние модификационного нанослоя висмута на перенос заряда в гетероструктурах $\text{Sb-Si}(n)\text{-Bi-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}\text{-Sb}$

© А.Б. Кондрат[¶], Н.И. Попович, Н.И. Довгошей

Ужгородский национальный университет,
88000 Ужгород, Украина

(Получена 24 февраля 2004 г. Принята к печати 26 февраля 2004 г.)

Исследовались вольт-амперные характеристики гетероструктур $\text{Sb-Si}(n)\text{-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}\text{-Sb}$ и $\text{Sb-Si}(n)\text{-Bi-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}\text{-Sb}$. Установлено, что наличие атомов висмута в переходной области приводит к увеличению тока, протекающего через структуру. Область объемного заряда, а соответственно и величина проникновения контактного поля в p -область лежат в пределах 0.2–0.5 мкм. Введение модификационного слоя висмута также приводит к качественным изменениям вольт-амперной характеристики, что свидетельствует об изменении механизма переноса носителей заряда в структуре. Введение нанослоя Bi обуславливает переход от резкого гетероперехода к плавному.

В структурах с модифицированным переходным слоем наблюдается отсутствие мягкого пробоя. Мягкий пробой наблюдается при обратном смещении, причем напряжение отсечки ~ 0.62 В отвечает барьеру для электронов 0.65 эВ.

1. Введение

В наше время осуществляется поиск новых комбинаций пленка–кристалл с целью создания гетероструктур нового функционального предназначения, а также гетероструктур с повышенной радиационной устойчивостью. Часть работ по исследованию такого класса гетероструктур выполнены с использованием пленок бинарных халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП). Использование сложных ХСП значительно расширяет круг комбинаций пар гетероструктур аморфная пленка–кристалл. Выбор гетероструктуры $\text{Sb-Si}(n)\text{-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}\text{-Sb}$ в качестве объекта исследований осуществлен на основании расчета порога фотоэмиссии стекол системы Ge-As-Se , который показал, что разрыв зоны проводимости для такой гетероструктуры близок к нулю. Кроме того, пленки $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ применяются в качестве оптических покрытий ИК-техники благодаря своей прозрачности в области длины волны от 1 до 12 мкм, устойчивости к действию агрессивных сред. Такие пленки применялись также для уменьшения обратных токов кремниевых диодных структур [1].

Одним из различий между гомо- и гетеропереходами является возникновение в последних переходного слоя на границе раздела двух различных полупроводников. Переходные слои существенно влияют на характеристики гетеропереходов, как правило, ухудшая их. Образование переходной области зависит от технологических условий изготовления структур. Одним из путей улучшения свойств гетероструктуры является модификация переходного слоя, т.е. введение небольшого количества примеси на поверхность раздела. Существенным остается вопрос выбора материала для модификации. Наше внимание было направлено на использование в качестве модификатора висмута Bi. Известно, что висмут имеет наибольший среди металлов коэффициент диффузии, а

также может приводить к инверсии знака основных носителей заряда халькогенидных стеклообразных полупроводников [2]. Раньше исследовалась модификация переходной области гетероструктуры $\text{Si}(p)\text{-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ металлами Cu, Pb, Sb, In, Bi [3]. Модификация переходной области атомами Bi дает наилучшее значение коэффициента выпрямления, но в этом случае существенным недостатком является возникновение мягкого пробоя при обратных смещениях.

Еще не до конца изученным оставалось влияние переходного слоя на электрофизические свойства гетероперехода $\text{Si}(n)\text{-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$. Поэтому цель данной работы заключалась в исследовании влияния модификации переходной области на электрофизические свойства гетероструктуры аморфная пленка $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}\text{-Si}(n)$.

2. Методика исследований

Напыление пленок $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ на кремниевые подложки осуществлялось на установке ВУП-5М. Испарение стекол $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ происходило из квазизамкнутых испарителей (ячейка Кнудсена), изготовленных из тонкой ($d < 0.1$ мкм) танталовой фольги [4]. Для обеспечения условий эффузионного испарения вещества соотношение эффективной площади отверстий S_1 и общей площади ячейки S_0 выбиралось как

$$100S_1 < S_0. \quad (1)$$

Для исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) экспериментальных образцов переменное напряжение в форме треугольных импульсов подавалось на исследуемую структуру от генератора сигналов и записывалось самописцем. Генератор сигналов позволял изменять частоту импульсов и их амплитуду. Отдельные точки ВАХ формировались при помощи источника постоянного напряжения, вольтметра и усилителя.

[¶] E-mail: moshenec@rambler.ru

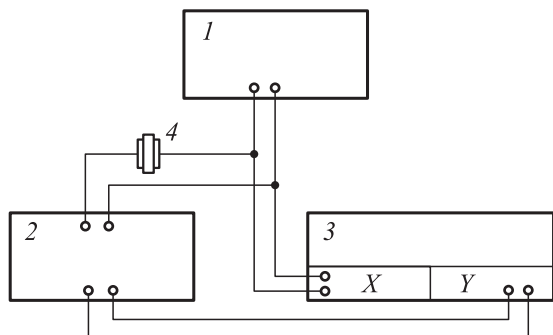


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения ВАХ экспериментальных образцов: 1 — генератор сигналов специальной формы Г6-15; 2 — усилитель У5-9; 3 — двухкоординатный самописец (Н307/1); 4 — исследуемый образец.

Напряжение измерялось в пределах 0.001–5 В с погрешностью 2%, а ток — в интервале 10^{-13} – 10^{-4} А с погрешностью 3%. Блок-схема установки для измерения ВАХ изображена на рис. 1.

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены вольт-амперные характеристики структуры $\text{Sb-Si}(n)\text{-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}\text{-Sb}$ без модификации переходного слоя (а) и с переходным слоем, модифицированным атомами Вi (b) (т.е. $\text{Sb-Si}(n)\text{-Bi-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}\text{-Sb}$). Толщина пленки $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ составляла 0.2 мкм. Выбор сурьмы в качестве материала для электродов обусловлен тем, что он создает с пленкой $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ и с кремнием *n*-типа инжектирующие контакты [5–8]. Выбор висмута в качестве модификатора объясняется тем, что он может изменять тип проводимости ХСП с *p*-типа на *n*-тип [2]. С целью выяснения влияния структуры $\text{Sb-Si}(n)\text{-Bi}$ на свойства гетероперехода в целом также исследовались ВАХ такой структуры (рис. 3). Очевидно, что влияние такой структуры не является определяющим, а нанослой Вi действительно исполняет роль модификационного.

Как видно из рис. 2, висмут приводит к значительному увеличению тока через структуру, что частично объясняется уменьшением эффективной толщины высокоомной пленки $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ и уменьшением толщины (или полным исчезновением) слоя SiO_2 на поверхности кремния в результате диффузии Вi. Введение модификационного слоя Вi также приводит к качественным изменениям вида ВАХ, что может свидетельствовать об изменении механизма переноса носителей заряда в исследуемой структуре.

Так как Вi характеризуется большим значением коэффициента диффузии, реальная толщина пленки $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ в структуре с модифицированным переходным слоем меньше, чем без слоя Вi. Поэтому исследовались структуры $\text{Sb-Si}(n)\text{-Bi-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}\text{-Sb}$ с пленкой $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ толщиной 0.5 мкм. ВАХ этой

структуры показана на рис. 4. В литературе отсутствуют сведения о коэффициентах диффузии металлов в ХСП, поэтому точно посчитать глубину проникновения Вi в пленку $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ невозможно.

Отличия ВАХ структур $\text{Sb-Si}(n)\text{-Bi-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}\text{-Sb}$ с пленками $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ разной толщины можно объяснить следующим образом. Известно, что коэффициент выпрямления зависит от толщины пленки [9], что объясняется размещением области объемного заряда в пленке. Коэффициент выпрямления достигает максимального значения в случае, когда весь объемный заряд, обуслов-

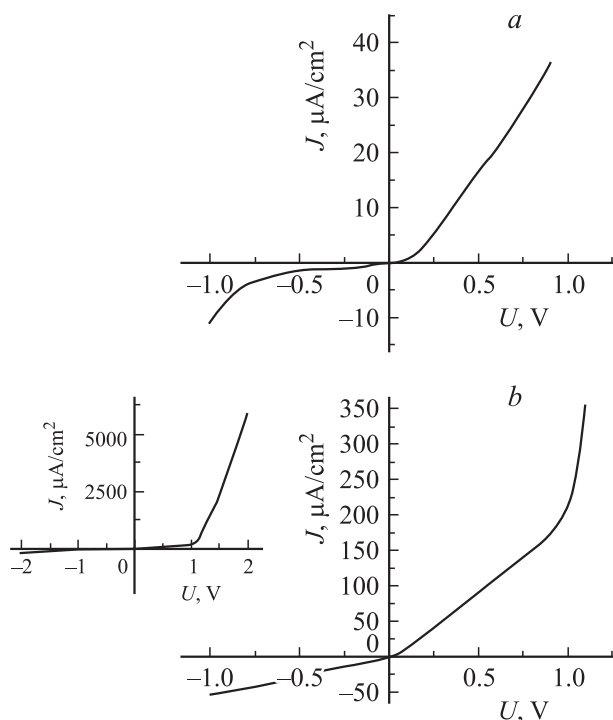


Рис. 2. ВАХ структуры $\text{Sb-Si}(n)\text{-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}\text{-Sb}$, положительное напряжение приложено к Si, толщина пленки $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ составляет 0.2 мкм: а — без модификации переходного слоя, б — с модифицированным переходным слоем в разных масштабах.

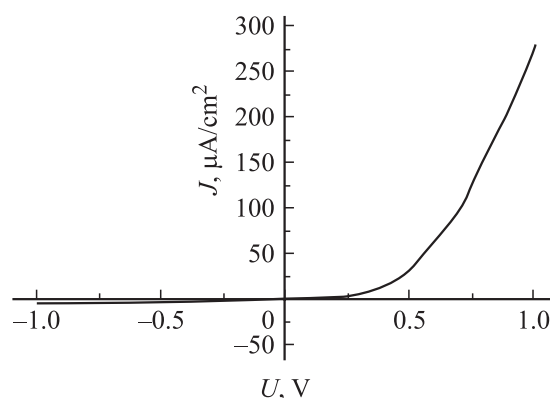


Рис. 3. ВАХ структуры $\text{Sb-Si}(n)\text{-Bi}$, положительное напряжение приложено к Вi.

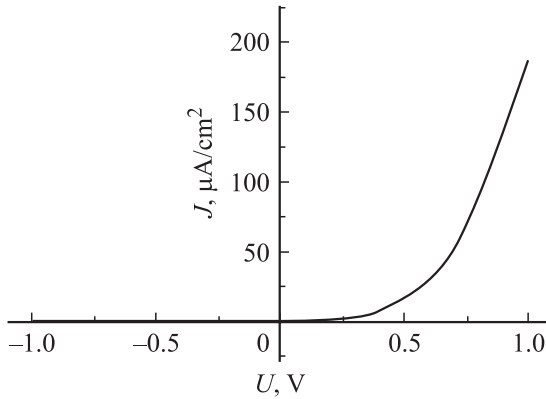


Рис. 4. ВАХ структуры $\text{Sb-Si}(n)\text{-Bi-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}\text{-Sb}$, положительное напряжение приложено к Si, толщина пленки $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ составляет 0.5 мкм.

ленный контактной разницей потенциалов, вкладывается в толщину пленки. При дальнейшем увеличении толщины пленки увеличивается последовательное сопротивление перехода, ограничивающее прямой ток, а это приводит к уменьшению коэффициента выпрямления.

Анализируя ВАХ (рис. 2, b и 4) и величины коэффициентов выпрямления (см. таблицу), можно прийти к выводу, что область объемного заряда (а соответственно и величина проникновения контактного поля в p -область) лежит в пределах 0.2–0.5 мкм с поправкой на диффузию Bi. В случае, когда толщина пленки $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ равна 0.2 мкм, коэффициент выпрямления меньше, чем при толщине пленки 0.5 мкм. Следовательно, можем утверждать, что в первом случае толщина пленки недостаточна для размещения всего объемного заряда. В гетероструктурах с пленкой $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ толщиной 0.5 мкм наблюдается уменьшение величины прямого тока по сравнению с гетероструктурами, толщина пленки в которых составляла 0.2 мкм. Таким образом, толщина пленки в этом случае больше ширины области объемного заряда, т.е. можно принять $d \approx 0.4$ мкм в качестве величины проникновения контактного поля в p -область гетероперехода.

Коэффициенты выпрямления исследуемых структур при напряжении 0.3 В

Структура	Толщина пленки $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$, мкм	Коэффициент выпрямления
$\text{Sb-Si}(n)\text{-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}\text{-Sb}$	0.2	7
$\text{Sb-Si}(n)\text{-Bi-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}\text{-Sb}$	0.2*	2.7
$\text{Sb-Si}(n)\text{-Bi-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}\text{-Sb}$	0.5*	82.4

Примечание. * С поправкой на диффузию висмута.

Данный факт противоречит теории, которая не учитывает переходные области гетеропереходов. Согласно этой теории, расчетная толщина слоя объемного заряда в пленке $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ при отсутствии внешнего поля составляет $W_1 = 2.74$ нм. Разница объясняется наличием

переходного слоя, в частности неоднородностью слоя пленки $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ толщиной порядка нескольких десятков нанометров и наличием слоя окиси кремния SiO_2 толщиной 5–10 нм на поверхности кремния. Кроме того, введение нанослоя висмута вызывает переход от резкого гетероперехода к плавному в исследуемой структуре.

На рис. 5 изображены ВАХ исследуемых структур в полулогарифмическом масштабе. Здесь наблюдается экспоненциальная зависимость тока от напряжения. Такую зависимость можно аппроксимировать выражением типа

$$I = I_{01} \cdot \exp(\beta_1 U) + I_{02} \cdot \exp(\beta_2 U), \quad (2)$$

причем коэффициент β_1 одинаковый для обеих кривых, а β_2 — различный. Следует также отметить, что на ВАХ структур (рис. 2, a, 4) отсутствует омический участок при низких значениях приложенного положительного

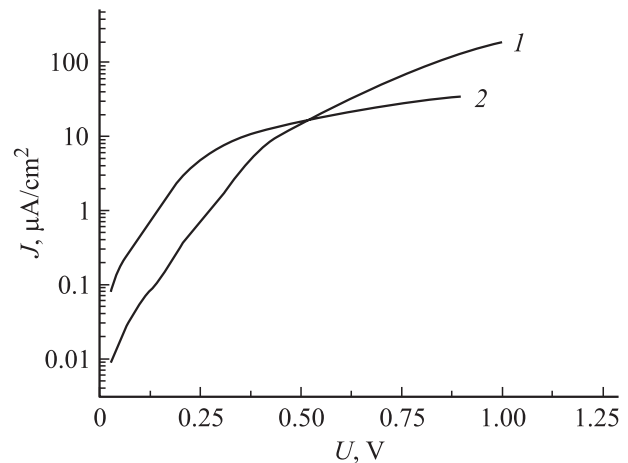


Рис. 5. Положительные ветки ВАХ в полулогарифмическом масштабе: 1 — структура $\text{Sb-Si}(n)\text{-Bi-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}\text{-Sb}$, 2 — структура $\text{Sb-Si}(n)\text{-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}\text{-Sb}$, толщина пленки $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ 0.2 мкм.

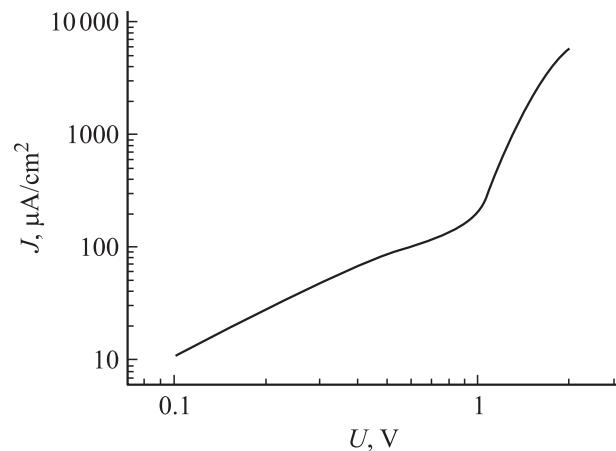


Рис. 6. Положительная ветка ВАХ структуры $\text{Sb-Si}(n)\text{-Bi-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}\text{-Sb}$ в логарифмическом масштабе, толщина пленки $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ равна 0.2 мкм.

напряжения, что свидетельствует об отсутствии барьера на границе разделения кремний–пленка ХСП.

Для структуры $\text{Sb-Si}(n)\text{-Bi-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}\text{-Sb}$ с пленкой $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ толщиной 0.2 мкм вольт-амперные характеристики спрямляются не в полулогарифмических, а в логарифмических координатах (рис. 6), т.е. наблюдается степенная зависимость тока от напряжения $I \propto V^m$, причем можно выделить несколько участков с различными показателями степени m . Такая зависимость характерна для гетеропереходов с высокоомным слоем на границе раздела [9]. Для объяснения этих результатов можно применить теорию токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ), для случая монополярной инжекции [9,10].

При модификации переходной области интересной и одновременно полезной особенностью является отсутствие мягкого пробоя в структурах с модифицированным переходным слоем (рис. 2, 4), что улучшает характеристики гетероперехода. Отсутствие мягкого пробоя можно объяснить исключением электронов из процесса токопереноса при модификации переходной области нанослоем висмута. Мягкий пробой наблюдается при обратном смещении, причем напряжение отсечки, равное ~ 0.62 В (рис. 2, а), соответствует барьеру для электронов 0.65 эВ.

4. Заключение

1. Разработана технология модификации переходного слоя гетероструктуры $\text{Si}(n)\text{-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ атомами висмута.

2. Показано, что в структурах с модифицированным слоем исчезает мягкий пробой, обусловленный перенесением электронов при обратном смещении. Барьер для электронов на границе раздела составляет 0.62 эВ.

3. Показано, что при модификации переходной области нанослоем висмута происходит переход от резкого перехода к плавному, который можно объяснить диффузией металла в приповерхностные слои и дальнейшим увеличением области пространственного заряда.

Список литературы

- [1] С.В. Свечников, В.В. Химинец, Н.И. Довгошей. *Сложные некристаллические халькогениды и халькогалогениды и их применение в оптоэлектронике* (Киев, Наук. думка, 1992).
- [2] А.А. Айвазов, Б.Г. Будагян, С.П. Вихров, А.И. Попов. *Неупорядоченные полупроводники* (М., Изд-во МЭИ, 1995).
- [3] N.D. Savchenko, A.B. Kondrat, N.I. Dovgoshej, Yu.I. Bertsik. *Functional Mater.*, **1** (3), 6, 432 (1999).
- [4] *Технология тонких пленок*. Справочник (М., Сов. радио, 1974) т. 1.
- [5] N.I. Dovgoshej, O.B. Kondrat, R.M. Povch. *Functional Mater.*, **1** (3), 6, 437 (1999).

- [6] А.Б. Кондрат, Н.Д. Савченко, Н.И. Довгошей. *Вопр. атомной науки и техн.*, **6** (7), 248 (1998).
- [7] Н.И. Довгошей, А.Б. Кондрат, Н.Д. Савченко, Ю.Й. Сидор. *Физика и химия твердого тела*, **1** (1), 119 (2000).
- [8] *Материалы для полупроводниковых приборов и интегральных схем* (М., Высш. шк., 1975).
- [9] А.В. Симашкевич. *Гетеропереходы на основе полупроводниковых соединений $A^{IV}B^{VI}$* (Кишинев, Штиинца, 1980).
- [10] А. Милнс, Д. Фойхт. *Гетеропереходы и переходы металл–полупроводник*. [Пер. с англ.] (М., Мир, 1975).

Редактор Л.В. Беляков

The influence of a modified Bi-nanolayer on the charge transition in $\text{Sb-Si}(n)\text{-Bi-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}\text{-Sb}$ heterostructures

O. Kondrat, N. Popovich, N. Dovgoshey

Uzhgorod National University,
88000 Uzhgorod, Ukraine

Abstract Current–voltage characteristics of heterostructures $\text{Sb-Si}(n)\text{-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}\text{-Sb}$ and $\text{Sb-Si}(n)\text{-Bi-Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}\text{-Sb}$ have been investigated. It was established that Bi-atoms in the transition layer give a considerable increase of the current through-out the structure. The volume charge region and accordingly the magnitude of the contact field penetration into the p -region are within the range of 0.2–0.5 μm . The introduction of Bi modificative layer results in qualitative changes of the current-voltage characteristic. It means that the charge transition mechanism has changed. The Bi nanolayer causes a transition from a sharp to a smooth heterotransition. A soft breakdown was absent in the structures with the modified transition layer. The soft breakdown has observed at the back bias. The value of the cutoff voltage is ~ 0.62 V that corresponds to an electron barrier of 0.65 eV.