

НЕИДЕАЛЬНЫЙ ГЕТЕРОПЕРЕХОД p -PbTe— n -Si

Выдрок В. Н., Зубкова Т. И., Ильин В. И., Немов С. А.,
Рабизо О. В.

Исследованы фотоэлектрические свойства гетероструктур PbTe—Si и PbTe—SiO₂—Si, изготовленных термическим испарением в вакууме компенсированного теллурида свинца на монокристаллический кремний или на предварительно окисленную поверхность кремния с последующим отжигом гетероструктур на воздухе.

Полученные гетероструктуры обладали fotocувствительностью в диапазоне 0.7—6 мкм при 77 К. Наличие пленки окисла кремния толщиной 800—1200 Å на границе раздела теллурид свинца—кремний позволило реализовать нестационарный фотодиодный режим детектирования.

В результате комплексного исследования оптических, электрических и фотоэлектрических свойств гетероструктур определены особенности границы раздела теллурида свинца и кремния, а именно наличие пленки окисла кремния, образующейся в процессе отжига, и высокой плотности локальных (поверхностных) состояний $\sim (1 \cdot 10^{11} - 1 \cdot 10^{12}) \text{ см}^{-2}$. Рассчитана концентрация основных носителей заряда в слоях теллурида свинца, равная для различных образцов $(0.5 \div 1.0) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, определены величины диффузионных потенциалов в теллуриде свинца и кремнии, средство к электрону теллурида свинца, равное $4.40 \pm 0.05 \text{ эВ}$, и построены энергетические диаграммы исследованных гетероструктур.

В настоящее время интенсивно исследуются возможности создания гетерофотодиодов и гетеролазеров на халькогенидах свинца и твердых растворах на их основе. В [1, 2] была показана возможность создания fotocувствительного неидеального гетероперехода, получаемого вакуумной конденсацией сульфида свинца на кремний. На границе раздела материалов поверхностные состояния выступают не только как центры рекомбинации, но и как носители локального заряда. Экранирование заряда поверхностных состояний создает существенный диффузионный потенциал в халькогениде свинца и тем самым обеспечивает fotocувствительность гетероструктуры в области края фундаментального поглощения узкозонной компоненты гетеропары.

Исследованные в настоящей работе гетероструктуры изготовлены методом вакуумной конденсации пленок теллурида свинца на кремнии марки КЭФ-1.0, КЭФ-1.5 или на предварительно окисленную поверхность кремния с толщиной окисла кремния 800—1000 Å.

В качестве шихты для напыления слоев использовался высокоомный PbTe, легированный донорной примесью хлора и компенсированный избытком теллура. Увеличение растворимости последнего в теллуриде свинца в присутствии электрически активной примеси обусловлено явлением самокомпенсации [3].

При изготовлении гетероструктур были использованы методы, позволяющие наиболее точно сохранить состав шихты в конденсируемых материалах: дискретного испарения и конденсации из газодинамического потока. Гетероструктуры подвергались низкотемпературному отжигу в присутствии кислорода. Омическими контактами служили золото и галлий-индиевая эвтектика для теллурида свинца и кремния соответственно.

Полученные гетероструктуры обладали широким спектром fotocувствительности ($\lambda \sim 0.9 - 6 \text{ мкм}$), включающим в себя области как собственного поглощения кремния, так и теллурида свинца (рис. 1).

Изучение спектров пропускания слоев РbТе на кремнии показало, что в процессе отжига гетероструктуры формируется полоса поглощения в области 9 мкм, обусловленная возбуждением валентных связей кремния с кислородом. Появление этой полосы поглощения связано с окислением поверхности кремния в области контакта с теллуридом свинца. Толщина окисла кремния, образующегося на границе раздела РbТе—Si в процессе активизации, рассчитывалась по интенсивности полосы поглощения и составляла для различных гетероструктур $100 \div 1000 \text{ \AA}$.

Повышение температуры отжига увеличивало дифференциальное сопротивление гетероструктур на 2—3 порядка, приближая его величину к значениям,

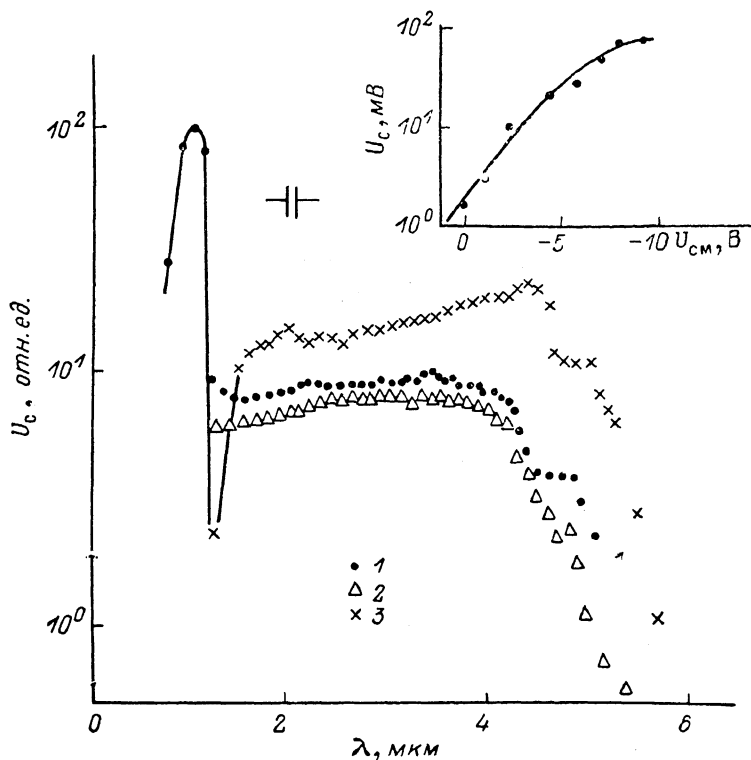


Рис. 1. Спектральные характеристики гетероструктур $p\text{-PbTe-n-Si}$ (1, 2) и $p\text{-PbTe-SiO}_2\text{-n-Si}$ (3) при 77 К.

Освещение со стороны: 1, 3 — Si, 2 — PbTe. На вставке — зависимость величины сигнала фотосовета (U_c) от напряжения смещения ($U_{см}$) гетероструктуры $p\text{-PbTe-SiO}_2\text{-n-Si}$.

типичным для структур со специально выращенным слоем SiO_2 на границе раздела теллурида свинца с кремнием. Таким образом, в изготовленных нами структурах на границе раздела присутствует пленка SiO_2 , наличие которой необходимо учитывать при изучении механизмов токопротекания.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) гетероструктур были исследованы при напряжениях смещения до $\pm 3 \text{ В}$ в диапазоне температур 77—300 К и подсветке как интегральным пучком света, так и через германиевый фильтр. Изготовленные гетероструктуры обладают выпрямляющими свойствами, прямое направление соответствует положительной полярности на теллуриде свинца. Прямые ветви ВАХ, построенные в полулогарифмическом масштабе, показывают наличие точек перегиба в области 0.1—0.3 при $T=300$ и 0.4—0.5 В при $T=77 \text{ К}$. Выше точек перегиба наблюдается степенная зависимость тока от напряжения ($j \sim u^n$) с показателем $n=1.5\text{—}3$. ВАХ при подсветке обнаруживает увеличение тока как в прямом, так и в обратном направлениях.

Важной особенностью исследованных гетероструктур является их существенная неидеальность, т. е. наличие на границе раздела таких структур

высокой плотности локальных или поверхностных состояний. Одной из возможных причин образования поверхностных состояний является большое несогласование постоянных кристаллических решеток кремния и теллурида свинца $\sim 17\%$. Основным аргументом, подтверждающим существование поверхностных состояний на границе раздела, явилось изучение спектральных характеристик изотипных гетероструктур $n\text{-PbTe}-n\text{-Si}$ в режиме холостого хода. Исследования показали, что при длине волны $\lambda \approx 1.3$ мкм происходит смена знака фотоэдс, что является прямым доказательством наличия в гетероструктурах высокой плотности поверхностных состояний, формирующих области пространственного заряда по обе стороны границы раздела (рис. 2). Не менее важным экспериментальным фактом, подтверждающим наличие поверхностных состояний, является частотная зависимость вольт-фарадных характеристик. Оценка времени захвата на поверхностные состояния из вольт-фарадных характеристик дает величину $\sim (10^{-6}-10^{-7})$ с. Для расчета плотности

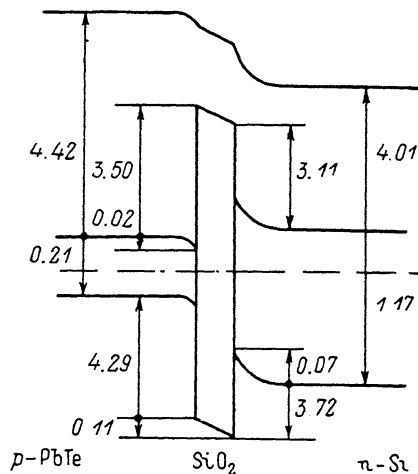
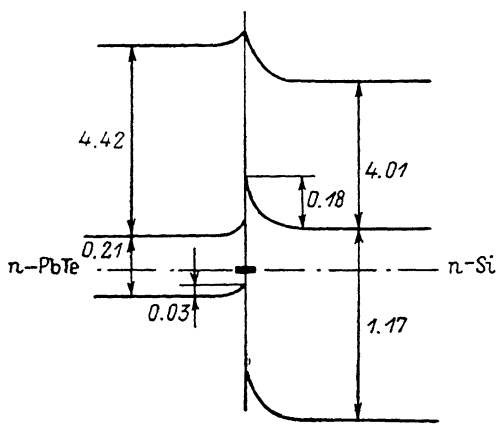


Рис. 2. Энергетическая диаграмма изотипного гетероперехода $n\text{-PbTe}-n\text{-Si}$ (энергия измеряется в эВ).

Рис. 3. Энергетическая диаграмма анизотипного гетероперехода $p\text{-PbTe}-\text{SiO}_2-n\text{-Si}$ (энергия измеряется в эВ).

поверхностных состояний на границе раздела $\text{PbTe}-\text{Si}$ использовали стандартную методику, основанную на расчете плотности заряда в обедненных областях кремния и теллурида свинца и условию электронейтральности гетероперехода в целом. В структурах $\text{PbTe}-\text{SiO}_2-\text{Si}$ учитывался также и заряд окисла. Расчеты показали существование на границе раздела материалов высокой плотности поверхностных состояний $\sim (1 \cdot 10^{11}-1 \cdot 10^{12})$ см $^{-2}$ при 77 К.

Для построения энергетических диаграмм исследованных структур необходимо определить такие параметры, как величины диффузионных потенциалов в кремнии и теллуриде свинца, часть контактной разности потенциалов, падающей на слое окисла, уровень легирования теллурида свинца. Эти параметры были определены из фотоэлектрических свойств гетероструктур.

При достаточно больших интенсивностях излучения, таких, что исчезает область пространственного заряда в полупроводниках, величина барьерной фотоэдс соответствует изгибу энергетических зон в гетероструктуре. Таким образом, были оценены величины диффузионных потенциалов в компонентах гетероструктур. Отметим, что присутствие на границе раздела материалов локальных зарядов создает в теллуриде свинца заметный диффузионный потенциал (до 0.05 эВ), тогда как в идеальном гетеропереходе вследствие большой диэлектрической проницаемости теллурида свинца этот потенциал не может превышать 10^{-4} эВ.

Уровень легирования в пленках теллурида свинца обычно определяют из измерений эффекта Холла на образцах-спутниках. В данной работе использован способ измерения уровня легирования теллурида свинца, основанный на из-

мерении величин фотоэда гетероструктуры при малых (U_I) и высоких ($U_{нас}$) уровнях возбуждения, величин фотоответа τ и оптических констант теллурида свинца в области собственного поглощения. Расчет концентрации основных носителей заряда проводился по формуле

$$n = \frac{\tau I}{d} \frac{\exp(qU_{нас}/k_B T)}{U_I} (1 - e^{-\alpha d}),$$

где α — коэффициент поглощения в теллуриде свинца, d — толщина слоя теллурида свинца, I — интенсивность света.

Расчет при 77 К дал величину концентрации дырок в теллуриде свинца для различных образцов $p \approx (0.5 \div 1.0) \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$.

Часть контактной разности потенциалов, падающей на слое окисла кремния, определялась из сравнения величин диффузионных потенциалов в гетероструктурах, найденных из фотоэда насыщения и рассчитанных из разности работ выхода теллурида свинца и кремния.

Полученные величины концентрации в теллуриде свинца и диффузионных потенциалов гетероструктур позволили определить средство к электрону теллурида свинца, равное (4.40 ± 0.05) эВ, которое находится в согласии с данными [4], и построить энергетические диаграммы исследованных гетероструктур (рис. 3).

Гетеропереходы PbTe—Si обладают фоточувствительностью в режиме фотоэда. Структуры PbTe—SiO $_2$ —Si могут быть использованы также и в фотодиодном режиме (см. вставку на рис. 1), что представляется интересным с точки зрения их практического использования.

Таким образом, получены фоточувствительные гетероструктуры PbTe—Si и PbTe—SiO $_2$ —Si, исследованы их электрические и фотоэлектрические характеристики, оценена плотность поверхностных состояний на границе раздела материалов, определено средство к электрону в PbTe и построены их энергетические диаграммы. Показано, что фоточувствительность гетероструктур в области поглощения теллурида свинца потенциально связана с неидеальностью гетероперехода.

Список литературы

- [1] Бакуева Л. Г., Винчаков В. Н., Зубкова Т. И. // ФТП. 1978. Т. 12. В. 4. С. 820—822.
- [2] Бакуева Л. Г., Зубкова Т. И., Ильин В. И. // ФТП. 1978. Т. 13. В. 2. С. 345—347.
- [3] Кайданов В. И., Немов С. А., Равич Ю. И., Дереза А. Ю. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 10. С. 1857—1860.
- [4] Perfetti P., Carrina F., Coluzza C., Margaritondo G. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 2. P. 972—973.

Ленинградский технический университет

Получена 25.06.1990

Принята к печати 10.09.1990