

О ПРИРОДЕ АФН-ЭФФЕКТА В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНКАХ ТЕЛЛУРИДА МЕДИ И ИНДИЯ

Р. Найманбаев, М. Тохиров, С.С. Сабилов, Р.А. Нурдинова

Ферганский филиал Ташкентского университета информационных технологий,
712018 Фергана, Узбекистан
(Получена 20.02.2010; переработана 13.08.2012)

Мақолада аномал юқори кучлиниш берадиган теллурид мис ва индий қотишмасидан вакуумда дискрет бугланиш билан олиган юққа пардаларни текшириш натижалари келтирилган. Юққа пардалардаги ортиқча Те атомлари АФК ва ρ га таъсири аниқлашган. АФК табиати, спектрал ва бурчак характеристикалари топилган.

Исследован АФН-эффект в поликристаллических тонких пленках теллурида меди и индия, полученных дискретным испарением в вакууме. Показано, что избыточное содержание атомов Те в пленке существенно влияет на АФН и удельное сопротивление пленок. Механизм образования АФН обсуждается на основе полученных угловых и спектральных зависимостей.

The APV-effect in polycrystal thin films of telluride copper and indium received by discrete evaporation in vacuum has been investigated. It is shown that the surplus content of Te atoms influences on APV-effect and specific resistance of films. The mechanism of formation of APV is discussed on the basis of angular and spectral dependences.

АФН-эффект, обнаруженный в поликристаллических слоях теллурида меди и индия [1] представляет интерес как в связи с возможностями практических применений, так и с точки зрения его физической природы.

Экспериментальные результаты. Пленки теллурида меди и индия получали напылением в вакууме 10^{-4} – 10^{-5} мм рт.ст. на различные подложки (кварц, стекло, фарфор, слюда, тефлон), нагретые до 200–250°C и расположенные под углом 20–45° к направлению молекулярного пучка. Толщина слоев составляла 0,5–1,8 мкм, сопротивление – 10^8 – 10^{12} Ом. Тип проводимости пленок, определяемый по знаку термо-ЭДС, в большинстве случаев соответствовал дырочной проводимости. Однако пленки с недостаточным содержанием Те имели проводимость n -типа. Влияние избыточного количества Те в испаряемом веществе существенно влияет на АФН и сопротивление пленок (рис. 1).

Знак фотонапряжения соответствовал как положительной (тип А), так и отрицательной (тип Б) полярности на ближайшем к испарителю конце пленки. Фотонапряжения в пленках типа А, полученные на подложках из стекла и кварца, значительно выше, чем в слоях, полученных на подложках из керамики. Изменение фотонапряжения при изменении направления освещения подчинялось закону косинуса, что свидетельствует об отсутствии угловой зависимости фотонапряжения. Перемены знака фотонапряжения при освещении со стороны подложки, как правило, не наблюдалось. Величина фотонапряжения в пленках типа А толщиной 0,7–1,5 мкм при комнатной температуре достигала ~700 В/см. С увеличением толщины пленок фотонапряжение монотонно падало.

Типичные люкс-вольтовые и люкс-амперные зависимости фотонапряжения и тока короткого замыкания приведены на рис. 2. Эти характеристики пленок теллурида меди и индия линейны в исследованном интервале освещенностей.

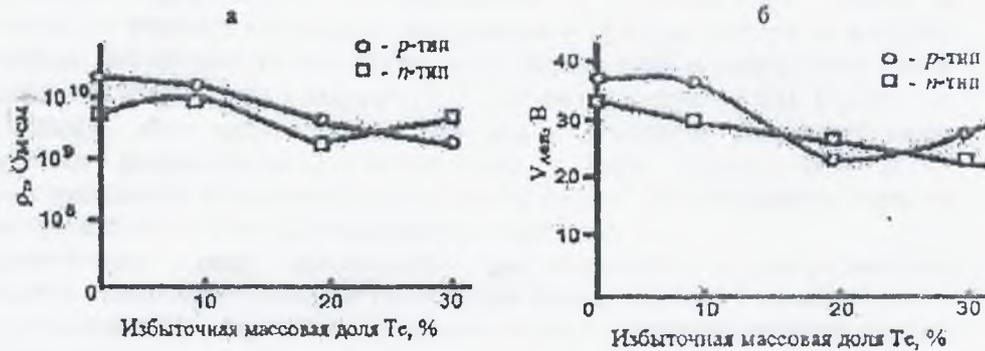


Рис. 1. Зависимости темнового удельного сопротивления (а) и АФН (б) пленок теллурида меди и индия *n*- и *p*-типов, полученных вакуумным испарением при температуре кварцевой подложки 250°C, от избыточного содержания теллура в испаряемом веществе.

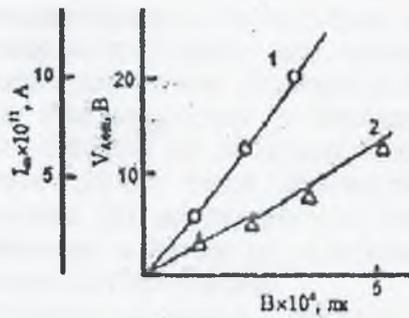


Рис. 2. Зависимость АФН эффекта от освещенности: 1 – фотонапряжение, 2 – ток короткого замыкания.

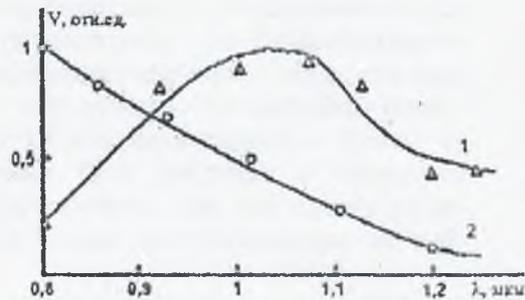


Рис. 3. Спектральное распределение фотонапряжения в тонкой (0.7 мкм) (1) и толстой (1.5 мкм) (2) пленках.

Кривые спектральной чувствительности $V_{\text{АФН}}(\lambda)$ приведены на рис. 3. Наряду с пленками, у которых $V_{\text{АФН}}(\lambda)$ монотонно убывает, некоторые образцы АФН-пленок теллурида меди и индия имели спектр с максимумом в области длины волны 1.05 мкм [2].

Одним из важных условий получения пленок, обладающих аномально большими фотонапряжениями, является косое напыление. В результате наблюдается упорядоченный наклонный рост кристаллитов по отношению к плоскости подложки. Расположение микрокристаллитов создает высоковольтную АФН-батарею. Об этом свидетельствуют наличие двойного лучепреломления и зависимость фотонапряжения от направления плоскости поляризации падающего света, наблюдаемые нами на опыте в этих пленках. Нарушение упорядоченности

деформацией или изменением технологических параметров вызывает уменьшение фотонапряжения.

Для выяснения вопроса о механизме образования фотонапряжения выполнены одновременные исследования фотонапряжения и сопротивления пленок в зависимости от газового окружения, температуры и прогрева пленок на воздухе. Установлено, что пленки, изготовленные из теллурида меди и индия, сразу после образования на воздухе или в вакууме ($\approx 10^{-5}$ Па) не генерируют АФН. Однако, по мере хранения этих пленок на воздухе или в атмосфере различных газов генерируемое фотонапряжение увеличивается и через определенное время достигает насыщения в зависимости от толщины пленок. При нагревании слоев на воздухе процесс насыщения фотонапряжения ускоряется.

Соответствие между изменениями фотонапряжения и сопротивления наблюдается также при изменении температуры пленок, причем с ее понижением резко увеличивается сопротивление, сопровождаемое соответствующим ростом фотонапряжения.

Обсуждение результатов. Существующие в настоящее время теории АФН-эффекта [2-6] позволяют высказать предположение о наличии двух различных механизмов возникновения аномально высокого фотонапряжения в полупроводниковых тонких пленках теллурида меди и индия. Опытные данные показывают однозначную связь между величиной и знаком фотонапряжения и направлением барьеров, существующих на поверхности микрокристалликов пленки [7]. Данное обстоятельство дает основание предположить, что фотонапряжение обусловлено разделением созданных светом электронно-дырочных пар полем этих барьеров. Результирующее фотонапряжение обусловлено асимметрией потенциальных барьеров на различных поверхностях микрокристаллитов. Одной из возможных причин такой асимметрии может быть различие в скоростях рекомбинации [8] на поверхностях микрокристаллитов, что не противоречит предложенному в работе [9] механизму образования фотонапряжения за счет аномального Дембер-эффекта.

Обратимые изменения фотонапряжения и сопротивления при хранении и прогреве пленок на воздухе и в атмосфере различных газов, а также их температурные изменения и зависимость от структуры пленки связаны с суммированием элементарных фотонапряжений [10]. Такое суммирование обусловлено упорядоченным ступенчатым строением поверхности пленок при косом напылении. Ступенчатое строение поверхности пленок подтверждают электронно-микроскопические исследования [11].

Существует вероятность, что потенциальные барьеры в пленке теллурида меди и индия практически не моделируются освещением. Причина, по-видимому, в том, что неосновные неравновесные носители не доходят до барьера. Очевидно, что характер поверхностных барьеров, существующих в пленках теллурида меди и индия с избытком Те, может существенно отличаться от характера барьеров до прогрева пленок. Результирующие барьеры АФН-пленок теллурида меди и индия с избытком Те, а также и сопротивление пленок будут сильно зависеть как от величины и характера барьеров (дрейфовых или рекомбинационных) до прогрева, так и от реальных условий диффузии и миграции атомов Те в пленку теллурида меди и индия.

Результаты настоящей работы не позволяют сделать окончательный вывод о механизме АФН-эффекта в слоях теллурида меди и индия (в частности, о модуляции барьеров светом), нужны, несомненно, дальнейшие исследования.

Наблюдаемая на эксперименте тенденция спада фотонапряжения, удельного сопротивления ρ пленок теллурида меди и индия, полученных вакуумным испарением при температуре подложки $\sim 250^\circ\text{C}$, от избыточного содержания теллура можно объяснить следующим обстоятельством. Избыточное количество Те обуславливает наличие дополнительных ловушечных уровней, а также неоднородностей состава, которые оказывают сильное воздействие на процесс переноса неосновных носителей (электронов) в АФН-пленках теллурида меди и индия. Согласно данным [12], в широком диапазоне значений интенсивности (B) падающего на поверхность пленки света, фототоки через переходы пропорциональны освещенности, т.е. $I\Phi = aB$, где a – коэффициент, имеющий смысл фоточувствительности переходов, величина которых зависит от коэффициента поглощения, толщины пленки, длины диффузии носителей, скоростей поверхностной рекомбинации на освещенной и неосвещенной гранях микрокристалла, а также от соотношений между скоростями объемной и поверхностной рекомбинации носителей и глубиной проникновения света. В микро- n - p -переходах с достаточно тонкой базой влиянием рекомбинации можно пренебречь, в этих условиях фототок равен произведению элементарного заряда на полное число носителей, генерируемых светом в единицу времени во всем объеме. Тогда величина фототока прямо пропорциональна интенсивности при любых уровнях возбуждения. Этот вывод хорошо согласуется с опытом (рис. 2). Такие люкс-вольтовые и люкс-амперные характеристики получаются при любом соотношении фото- и темновых токов в микро- p - n - и n - p -переходах АФН-пленки. Согласно спектральным зависимостям фотонапряжения АФН-пленок теллурида меди и индия, их длинноволновая граница соответствует краю собственного поглощения (рис. 3). Спектральные характеристики для разных образцов (толстых и тонких) отличаются друг от друга. Осажденная пленка имеет слоистую структуру, нижняя часть монослоев молекулярной толщины состоит из более летучего компонента, а приповерхностная – из менее летучего. В принципе такие монослои должны быть идеально стехиометричными. Однако из-за неоднородности зерен по размерам в пленке возникают неоднородности по составу. В результате положение максимума спектральной зависимости $V_{\text{АФН}}(\lambda)$ меняется и даже исчезает (рис. 3, кривая 2).

Заключение. Впервые обнаружен аномально большой фотоэлектрический эффект в тонких пленках теллурида меди и индия и экспериментально установлена зависимость $V_{\text{АФН}}$ от интенсивности и спектрального состава возбуждающего света, а также содержания теллура в пленках.

Выявлена барьерная природа возникновения АФН в пленках теллурида меди и индия на основе спектральных зависимостей и зависимости фотонапряжения от угла падения монохроматического коротковолнового света.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Найманбаев, С.О. Хатамов. В кн. «Фотоэлектрические явления в полупроводниках» (Ташкент, 2004), с. 165.

2. Фотоэлектрические явления в полупроводниках и оптоэлектроника. Под. ред. Э.И. Адировича (Ташкент, Фан, 1972).
3. Д.А. Аронов, Ю.М. Юабов, ФТП 18, №7, 1318 (1984).
4. К.М. Дешан, ФТП 24, №7, 1251 (1990).
5. В.Н. Агарев, Н.А. Степанова, ФТП 34, №4, 452 (2000).
6. Г.А. Набиев, ФИП 6, №1-2, 51 (2008).
7. Э.А. Абдуллаев и др., Узбек. физич. журн. № 6, 23 (1994).
8. П.П. Коноров, О.В. Романов, ФТТ 4, 1655 (1962).
9. Э.И. Адирович, ДАН СССР 150, 1252 (1963).
10. П.П. Коноров, ФТП 2, №12, 1724 (1968).
11. Р. Найманбаев. Канд. дисс. (Ташкент, ФТИ АН РУз, 1977).
12. Д.А. Аронов, В. Зайтова. Фотомагнитный эффект и фотопроводимость в полупроводниках при высоких уровнях возбуждения (Ташкент, Фан, 1987).