

ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ АФН-ПЛЕНОК В ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ ИЗ CdTe-SiO₂-Si ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

С.М. Отажонов

Ферганский Государственный Университет, Узбекистан

Поступила в редакцию 23.03.2004

Исследовано влияние внешнего стационарного электрического поля и поля коронного разряда на фототок $I_{кз}$ короткого замыкания аномального фотонапряжения (АФН) в гетероструктуре CdTe-SiO₂-Si в режиме “эффекта поля”. Обнаружена остаточная фоточувствительность АФН-пленки, обусловленная встроенными в диэлектрик SiO₂ объемными зарядами. Анализированы механизмы инверсии знака АФН и смещения ее по спектру $I_{кз}$ в зависимости от напряженности поляризующего диэлектрик электрического поля.

ВВЕДЕНИЕ

При изготовлении многоканальных фотоэлектрических преобразователей и других активных элементов схем оптоэлектроники проще и дешевле всего применять не эпитаксиальные, а поликристаллические пленки, напыленные на аморфные диэлектрические подложки из окиси или нитрида полупроводников [1 – 3]. Такие структуры представляют большой интерес, так как фоточувствительность их можно целенаправленно изменять в широком диапазоне спектра излучения под действием различных внешних воздействий, таких, как электрическое поле, механическая деформация и т.п.

Цель настоящей работы заключается в исследовании фотоэлектрических свойств гетероструктуры из CdTe-SiO₂-Si, которая позволяет разработать новые оптоэлектронные приборы на основе АФН-пленки с управляемыми физическими свойствами, в частности, транзистора с поляризующимся диэлектриком, допускающего электрическую перезапись информации. Здесь рассматривается влияние внешнего электрического поля в статическом режиме и в режиме коронного разряда, приложенного между слоем CdTe и оксидированной кристаллической пластиной Si, на фоточувствительность АФН-пленки. Анализируется механизм инверсии знака АФН и смещение ее по $I_{кз}$ спектру в зависимости от напряженности приложенного поля. Показано, что встроенные в диэлектрик SiO₂ объемные заряды индуцируют остаточную фоточувствительность, время релаксации которой составляет более 30 суток.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Поликристаллические пленки из CdTe толщиной ~0,8 мкм, обладающие АФН свойством, получены нанесением на оксидированную поверхность кристаллического кремния методом вакуумной технологии [4]. Температура подложки и скорость конденсации слоя составляли 300 К и 1,7 нм/с, соответственно, а угол напыления – 40°.

Взаимное расположение слоев структуры CdTe-SiO₂-Si и омических контактов к ним схематически показано на вставке *a* к рис. 1. Оказалось, что в такой структуре фоточувствительность АФН-слоя можно управлять под действием внешнего стационарного электрического поля и полем коронного разряда (по методу “эффекта поля”), которые как выясняется ниже, индуцируют встроенные электрические заряды в диэлектрике. Постоянное электрическое напряжение подавалось через поперечные контакты 1 – 2, а коронный разряд осуществлялся контактом 2 и электрическим зондовым контактом к поверхности полупроводника CdTe [5] (рис 1а). АФН-слой возбуждалась нормально падающим светом из монохроматора ИКМ-1. Генерируемое АФН измерялось электрометром ЭД-05М, через продольные контакты 1 – 1'. Все измерения производились при комнатной температуре.

На рис. 1 представлены спектральные зависимости тока короткого замыкания $I_{кз}(n)$ АФН-слоя для различных значений напряженности внешнего электрического поля, приложенного перпендикулярно к плоскости структуры CdTe-SiO₂-Si. Видно, что в отсутствии внешних воздействий в спектрах $I_{кз}(v)$ наблюдается инверсия знака $I_{кз}$ в окрестности значения энергии кванта света, равным $h\nu = 0,95$ эВ (кривая 5). Включение электрического поля между АФН-пленкой и кремнием приводит к существенному изменению спектральной чувствительности тока короткого замыкания $I_{кз}$. С ростом внешнего напряжения $U_{вн}$ в пределах его значений от 0 до 100 В положение инверсии знака тока короткого замыкания смещается в коротковолновую область спектра в интервале значения энергии кванта света от 1,2 эВ до 1,62 эВ. При дальнейшем росте приложенного напряжения ($U_{вн} > 100$ В) инверсия знака $I_{кз}$ постепенно исчезает и спектр $I_{кз}$ становится монополярным. При этом максимальное значение $I_{кз}$ при отсутствии внешнего электрического поля возрастает более чем в 1000 раз при $U_{вн} = 300$ В.

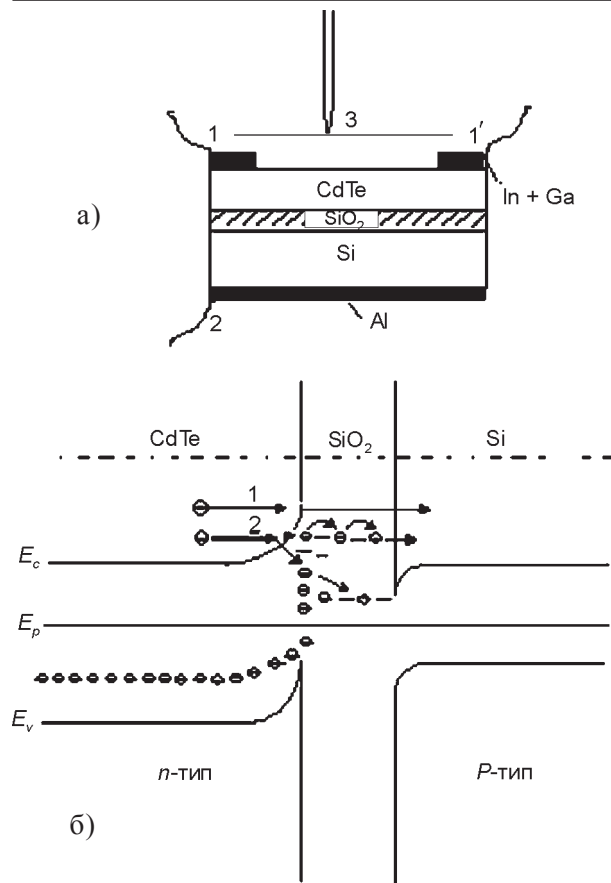


Рис. 1а. Схема возможных электронных переходов по энергетической зонной диаграмме структуры CdTe-SiO₂-Si.

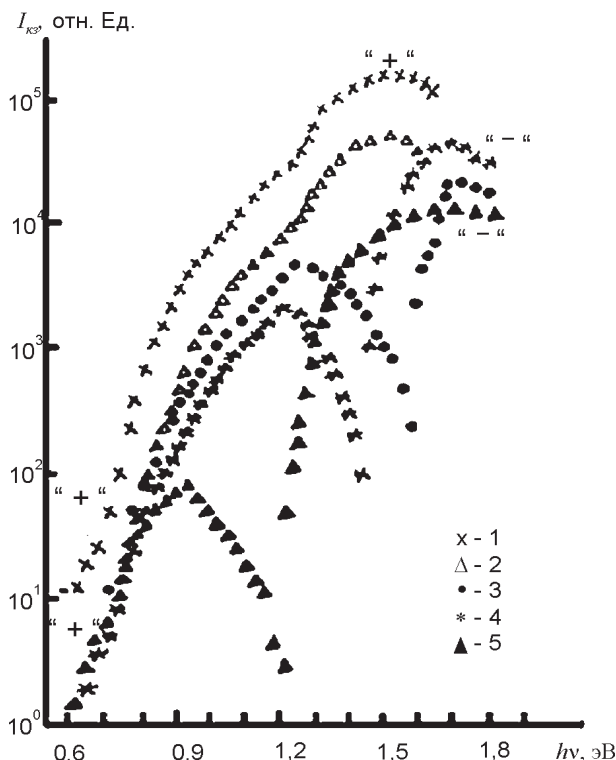


Рис. 1. Спектральные зависимости фототока короткого замыкания $I_{кз}$ АФН слоя структуры CdTe-SiO₂-Si при разных значениях внешнего напряжения: $U_{вн}=300$ В (кривая 1), 200 В (2), 100 В (3), 35 В (4), 0 В (5).

Интересно заметить, что спектральная фоточувствительность $I_{кз}$ АФН-пленки в структуре, подвергнутой к действию внешнего электрического поля, обнаруживает остаточный характер. Для изучения кинетику остаточной спектральной фоточувствительности в зависимости от времени выдержки были исследованы спектры $I_{кз}(v)$ после зарядки структуры в темноте внешним напряжением, равным $U_{вн}=300$ В.

На рис. 2 представлена спектральная зависимость тока короткого замыкания структуры CdTe-SiO₂-Si перед зарядкой (кривая 4), сразу после зарядки (кривая 1), после выдержки в темноте в течении 6 (кривая 2) и 19 (кривая 3) суток. Как видно из рисунка, сразу после зарядки с напряжением $U_{вн} = 300$ В максимум фоточувствительности по $I_{кз}(v)$ наблюдается при $h\nu = 1,60$ эВ, а с увеличением времени выдержки в темноте он смещается в длинноволновую область: до $h\nu = 1,1$ эВ при выдержке 6 суток и до $h\nu = 0,97$ эВ при – 19 суток. Эти исследования показывают, что с ростом времени выдержки исследуемой структуры в темноте остаточная спектральная фоточувствительность $I_{кз}(v)$ релаксируется в исходное положение с характерным временем $t \approx 30$ суток.

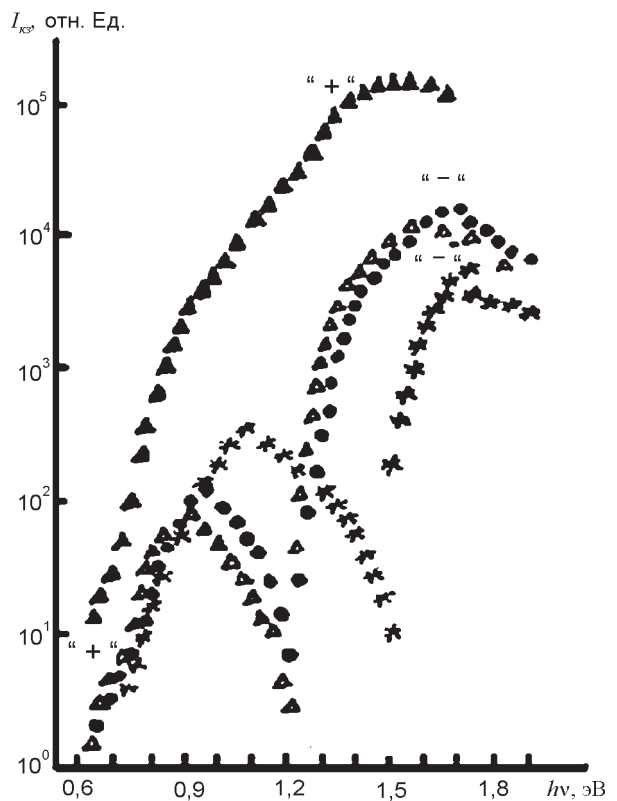


Рис. 2. Спектры $I_{кз}$ в зависимости от времени выдержки в темноте после зарядки структуры CdTe-SiO₂-Si под напряжением 300 В. Кривая 1 – сразу после зарядки, 2 – через 6 суток, 3 – через 19 суток, 4 – до зарядки.

Аналогичная картина остаточной спектральной фоточувствительности $I_{кз}(n)$ наблюдалась и при заряджении структуры CdTe-SiO₂-Si коронным разрядом, вызывающим внешним напряжением ~6 кВ. Как видно из рис. 3, при изменении поверхностного потенциала $j_{кр}$ коронной зарядки от 0 до 80 В максимум фоточувствительности $I_{кз}$ смещается в коротковолновую область спектра в пределах от 0,92 эВ до 1,32 эВ, а положение инверсии знака тока короткого замыкания смещается от 1,05 эВ до 1,4 эВ. При этом значение максимума $I_{кз}$ возрастает более чем в 550 раз при $\phi_{кр} = 80$ В.

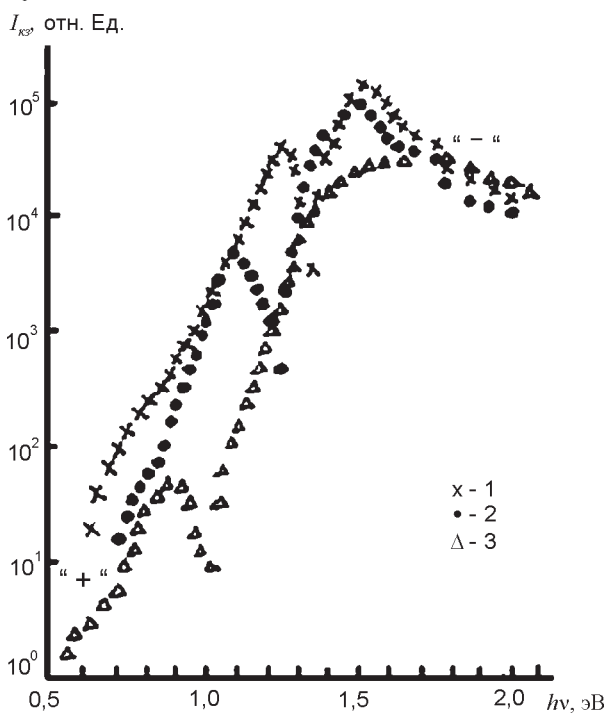


Рис. 3. Спектральные зависимости $I_{кз}$ для структуры CdTe-SiO₂-Si от величины потенциала коронной зарядки: $\phi_{кр} = 80$ В (кривая 1), 50 В (2), 0 В (3).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для качественного описания физической природы обнаруженной остаточной фоточувствительности и механизма явления электронного переноса, протекающего в структуре CdTe-SiO₂-Si (полупроводник – диэлектрик – полупроводник, т.е. ПДП), в условиях приложенного внешнего постоянного электрического напряжения, нами рассмотрена модель, в которой стационарный ток представляет собой из потока туннелирующих электронов из зоны проводимости полупроводника CdTe в зону проводимости полупроводника Si через слоя окисла SiO₂ (1 – вклад) и из зоны проводимости полупроводника в глубокий уровень (2 – вклад), находящейся в диэлектрике, и в том числе в ловушку на границе их раздела (см. рис. 1). Поскольку толщина окисла кремния в рассматриваемой нами структуре оказалась ~0,4 мкм, то по нашим оценкам первым вкладом

(менее 25 %) в суммарный ток через структуры ПДП можно пренебречь. Тогда можно предположить, что перенос электронов в основном осуществляется через поверхностные уровни и через уровни глубоких ловушек в диэлектрике.

Туннельное просачивание носителей тока из пленки CdTe в глубокие уровни диэлектрика из окисла кремния приводит к изменению степени заполнения как медленных поверхностных состояний, так и глубоких ловушек. А это, в зависимости от величины встроенного заряда, видоизменяет потенциальный рельеф АФН-пленки исследуемой структуры и, следовательно, скорость фотогенерации будет зависеть от величины встроенного заряда, т.е. от напряженности внешнего поляризирующего диэлектрик электрического поля. Это означает, что величина фото – ЭДС, обусловленная степенью асимметрии потенциального рельефа (т.е. косонапыленностью) АФН-пленки, можно управлять поперечным внешним электрическим полем.

При включении источника электрического напряжения на границе пленок CdTe и слоя диэлектрика происходит туннелирование носителей заряда (электронов или дырок) из полупроводника CdTe в глубокие уровни и ловушки диэлектрического слоя SiO₂. Носители заряда, индуцированные в пленке CdTe и на границе раздела его с диэлектриком в зависимости от величины встроенного заряда изменяют потенциальный рельеф пленки. Поэтому при фотовозбуждении АФН-слоя, фотоносители будут генерироваться под влиянием встроенного заряда диэлектрика. Так как, величина фото – ЭДС определяется асимметрией барьеров, которая изменяется с толщиной слоя, то электрическое поле встроенного заряда меняет распределение генерированных на поверхности носителей тока таким образом, что втягивает их в область, которая доступна только слабо поглощаемому электромагнитному излучению. Поэтому фото – ЭДС возникает и при длинноволновом возбуждении. Если асимметрия барьеров такова, что слабо поглощаемое излучение генерирует фото – ЭДС обратного знака по сравнению с сильно поглощаемым излучением, то под влиянием объемного заряда инверсия знака фото – ЭДС смещается в коротковолновую область, а фоточувствительность увеличивается в исследуемой нами области спектра электромагнитного излучения (как это видно из рис. 1).

Отметим, что при коронном разряде наблюдается изменение энергии активации глубокого уровня в SiO₂ в зависимости от потенциала коронного разряда (рис. 3). Это изменение связано с влиянием электрического поля на энергию оптической ионизации глубокого уровня в SiO₂. Если считаем, что изменение возникает за счет эффекта Пула – Френкеля [6], то смещение по энергии (ΔE) уровня можно оценить по формуле:

$$\Delta W = \sqrt{e^3 E / 4\pi\epsilon\epsilon_0}$$

где ΔW – энергетическое смещение уровня, E – напряженность электрического поля в окрестности дефекта, ϵ – диэлектрическая проницаемость CdTe, ϵ_0 – электрическая постоянная, e – заряд электрона. По нашим оценкам напряженность электрического поля в окрестности дефекта имеет значение $E = 10^5$ В/см.

Ситуация, возникающая в АФН-пленке CdTe на базе структуры CdTe-SiO₂-Si под действием встроенного электрического поля в диэлектрике, соответствует модели, разработанной для поликремневого полевого транзистора (см., например, [7]). Предлагаемая здесь модель аналогична модели [8], если формально идентифицировать слой SiO₂-Si с управляющим электродом полевого транзистора. Поэтому проведенные ранее численные расчеты для распределения потенциала в поликристаллическом полупроводнике вполне применимы для встроенного заряда АФН-пленки CdTe. Из результатов расчета воздействия внешнего электрического поля на потенциальный рельеф поликристаллической структуры следует, что слабое поле только деформирует пространственное и энергетическое распределения носителей, а сильное – приводит к уменьшению высоты межкристаллических потенциальных барьеров за счет перекрытия волновых функций электронов соседних кристаллитов в электрическом поле (т.е. как бы за счет объединения объема кристаллита). Эти рассуждения и результаты наших экспериментов показывают, что встроенное поле в диэлектрике SiO₂ может привести к уменьшению высоты потенциального барьера в АФН-пленке (при $U_{\text{вн}} < 10$ В), а в некоторых случаях к исчезновению его ($U_{\text{вн}} > 200$ В) в одной из ее приповерхностной, например, тыловой области, и тогда становится преобладающим оставшийся потенциальный барьер в другой – противоположной ее приповерхностной области.

Описанная здесь модель качественно хорошо отражает основные особенности кривых на рис. 2 и 3. Действительно, если считать, что знаки асимметрии потенциальных барьеров у фронтальной и тыловой приповерхностных областях

ФОТОЧУТЛИВІСТЬ АФН-ПЛІВОК У ГЕТЕРОСТРУКТУРІ З CDTE-SiO₂-Si ПІД ДІЄЮ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

С.М. Отажонов

Досліджено вплив зовнішнього стаціонарного електричного поля та поля коронного розряду на фотострум $I_{\text{кз}}$ короткого замикання аномальної фотонапруги (АФН) у гетероструктурі CdTe-SiO₂-Si у режимі “ефекту поля”. Виявлено залишкову фоточутливість АФН-плівки, яка зумовлена вбудованими в діелектрик SiO₂ об’ємними зарядами. Проаналізовано механізми інверсії знаку АФН і зсуву її по спектрі $I_{\text{кз}}$ у залежності від напруженості діелектрика електричного поля, який поляризує.

разные, то вполне естественным является наблюдение инверсии знака $I_{\text{кз}}$ и $V_{\text{АФН}}$ в зависимости от эффективной глубины поглощения возбуждающего света.

Включение внешнего электрического поля в структуре CdTe-SiO₂-Si подавляет генерации фото – ЭДС в одной из двух противоборствующих систем потенциальных барьеров. Так, в соответствии с кривыми на рисунках 2 и 3 наблюдается сначала смещение области инверсии знака $I_{\text{кз}}$, а затем полное исчезновение ее с ростом напряженности приложенного электрического поля.

Подводя итоги анализа результатов настоящей работы, можно сказать, что здесь обнаружен новый эффект – остаточная спектральная фоточувствительность АФН-пленки по току короткого замыкания и фото – ЭДС, индуцированная встроенным электрическим зарядом диэлектрика, создаваемым внешним статическим электрическим полем или полем коронного разряда в гетероструктуре CdTe (АФН-пленка). SiO₂ (диэлектрик) – Si (полупроводник).

ЛИТЕРАТУРА

1. Маслов В.В. и др. МНОП матрица для постоянных запоминающих устройств с электрической перезаписью // Электронная техника. – 1974. – Сер.3, №2. – С. 1501.
2. Гиновкер А.С., Ржанов А.В. Запоминающее устройство на основе МНОП структур // Микроэлектроника. – 1973. – Т. 2, № 5. – С. 379.
3. Абдуллаев Э.А., Вайткус Ю.Ю., Отажонов С.М. Запоминающее устройства // Патент ИДР № 9700869.1. от 15.03 1999
4. Вайткус Ю.Ю., Расулов Р.Я. Отажонов С.М. Особенности структуры и фотоэлектрические свойства поликристаллических пленок CdTe:Ag // Поверхность АН Россия. – 1999. – № 3. – С. 44 - 49.
5. Иванов Р.Н. Репрография: методы и средства копирования и размножения документов. – М.: сов. радио, 1977 – 384 с.
6. Юодвиршис А., Микалкявичюс М., Вянгрис С. Основы физики полупроводников. – Вильнюс.: Мокслас, 1985. – 352 с.
7. Lenzlinger M. and Snow E.H. // J. Appl. Phys. – 1969. – Vol. 40. – P. 278-283.
8. Guerrieri R., Giampolini P., Gnidi A. // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1986. – V.ED-33, № 8. – P. 1201-1206.

THE PHOTO-SENSITIVITY OF APV-FILMS IN HETERO-STRUCTURES CONSISTING OF CDTE-SiO₂-Si UNDER ACTION OF EXTERNAL ELECTRIC FIELD

S.M. Otazhenov

Influence of the external dc and discharge electric field on short circuit photocurrent $I_{\text{sh.c.}}$ of anomalous photo-voltage was investigated in layered heterostructure CdTe-SiO₂-Si in “field effect” mode. The residual photo-sensitivity of the AFV-film appeared due to a built-in bulk charge in SiO₂ insulator. Mechanisms of inversion of AFV sign and its dependence on an excitation wavelength is discussed and a dependence on the polarizing electric field in the insulator was explained.