

Что такое АФН-эффект

Н.Р.Рахимов

ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия

Аннотация: В данной статье приведены результаты исследований эффекта аномально высоких фотоэлектрических напряжений (АФН) в полупроводниковых плёночных системах. Исследована возможность использования оптрона открытого канала для оптоэлектронных систем на основе излучателя и АФН-приёмника. На базе АФН-плёнок разработаны новые оптоэлектронные системы различного назначения.

Ключевые слова: АФН-пленки, оптоэлектроника, научные сведения

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вопросы исследования фотоэлектрических свойств полупроводниковых пленок привлекают все больше внимания специалистов. Пленки, обладающие эффектом аномально фотонапряжения (АФН), представляют теоретический и практический интерес при создании первичных преобразователей – приемников оптического излучения (ПОИ).

Согласно принятой модели [1] эта трансформация складывается из трех этапов.

Во-первых, из этапа создания фототока I_{Φ_0} , обусловленного фотогенерацией и пространственным разделением неравновесных носителей на каждом микро- p - n -переходе.

Во-вторых, из этапа возникновения элементарных напряжений на микро- p - n -переходах в результате накопления объемных зарядов, создаваемых фототоком.

В-третьих, из этапа формирования аномально большого фотонапряжения путем суммирования элементарных фотонапряжений на p - n -переходах.

Существующие ПОИ и устройства на их основе требуют обязательного применения источников питания. В них выходное напряжение, создаваемое p - n -переходом в вентильном режиме, заведомо ограничено шириной запрещенной зоны полупроводника. Одним из перспективных оптических методов неразрушающего контроля является оптоэлектронный способ на основе излучателя и АФН-приемника, который позволяет исключить внешний источник питания для ПОИ, снизить вес и габариты, обеспечивает полную электрическую развязку между цепями «светоизлучающий диод – ПОИ».

К настоящему моменту в области АФН-эффекта накоплен значительный теоретический

и экспериментальный материал, позволяющий утверждать, что АФН-эффект может быть получен при нанесении плёнок из любых полупроводниковых материалов. Несмотря на это, не найден единый механизм, который раскрывает физическую природу этого явления.

1. ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

В 1946 г. Польские ученые Старкевич, Сосновский и Симпсон [2] наблюдали фотонапряжения $E_q = 1,2$ В в сульфиде свинца, у которого $E_q = 0,4$ В, причем авторы не только отметили этот факт как некоторую физическую аномалию, но и высказали для его объяснения некоторые идеи.

Изучением обнаруженного АФН-эффекта занимались на первом этапе Р. Я. Берлага с сотрудниками [3], Швабе [4], Пивковский [5] и др. По получению и исследованию АФН-эффекта имеется много работ, мы же здесь ограничиваемся ссылкой на библиографию, приведенную в работах [6–10].

Интерес к физическим и прикладным аспектам АФН-эффекта существенно увеличился после того, как Пенсак и Голдстейн [11] показали, что фотонапряжение в пленках $CdTe$ при комнатной температуре может достигать сотен вольт. Они выявили, что величина АФН зависит от толщины слоя и температуры подложки в процессе напыления пленки и для наличия большей подвижности при формировании АФН-эффекта в пленках теллурида кадмия важна температура подложки. Пенсак и Голдстейн показали, что оптимальная область температуры подложки лежит в пределах 150...200 °С, при температурах подложки 250 °С АФН-эффект отсутствовал.

В результате анализа многочисленных процесса напыления исследователи показали, что для получения эффективных пленок необходимо сочетание оптимальных значений давления и состава остаточных газов в вакуумной камере, температуры подложки и испарителя пленки и угла напыления. В [2, 3] была предложена модель аномально фотовольтаического эффекта, основанная на батареях из микро- p - n -переходов. Позднее, Швабе [4], исследовавший зависимость фотонапряжения от угла падения света, обнаружил инверсию знака $V_{\text{АФН}}$ при фронтальном освещении в пределах от 0 до 180 °С.

Этот результат, полученный на пленках PbS , не мог быть объяснен в рамках p - n -переходной

модели и вполне естественно, что Швабе предложил модель, основанную на батарее, в которой микрофотонапряжение возникает благодаря эффекту Дембера. Установлением таких зависимостей как $V_{\text{АФН}}$ от интенсивности света, температуры и т. д. нельзя было однозначно выявить тот или иной механизм АФН-эффекта. Полученный результат не могли связывать с вкладом каждого микроэлемента, поэтому нужно было проводить такие эксперименты, которые для обоих механизмов привели бы к диаметрально противоположным следствиям.

По мнению Э.И. Адировича с сотрудниками [1], которые развивали идею Швабе, результаты исследования угловых диаграмм в белом и монохроматическом свете могут служить критерием для определения физической причины возникновения АФН-эффекта.

Если АФН-структура представляет собой батарею p - n -переходов, то очевидно, что при фронтальной освещенности в пределах $0...180^\circ\text{C}$ инверсия знака $V_{\text{АФН}}$ должна отсутствовать.

Если АФН-структура представляет собой батарею демберовских элементов, то в белом свете при фронтальном освещении в пределах $0...180^\circ\text{C}$ знак фотонапряжения должен изменяться, однако, как показано в работе [12], возможен аномальный дембер-эффект. В этом случае знак дембер-эффекта не связан с направлением светового потока, а обусловлен различием скоростей поверхностей рекомбинации на различных гранях. Поэтому при аномальном дембер-эффекте, а также при фотовольтаическом эффекте на p - n -переходах $V_{\text{АФН}}$ не меняет знака при изменении угла падения света. В работе [13, 14] показано, что эта неопределенность устраняется, если производить угловые измерения $V_{\text{АФН}}$ (β) при освещении пленок монохроматическим светом с различными длинами волн.

Таким образом, в работах [9, 10] доказано, что наличие инверсии знака $V_{\text{АФН}}$ при изменении угла освещения в пределах $0...180^\circ\text{C}$ однозначно свидетельствует о том, что АФН-эффект обусловлен демберовским механизмом, а отсутствие инверсии не позволяет сделать однозначного вывода, ибо в этом случае может иметь место либо p - n -переходный механизм, либо аномальный дембер-эффект. Эту частичную неопределенность устранили путем перехода к исследованию $V_{\text{АФН}}(\beta)$ при освещении коротковолновым светом.

Аномальный дембер-эффект имеет место, когда скорость поверхностной рекомбинации на освещаемой грани достаточно велика, а на затемненной грани – мала. При длинноволновом возбуждении, т. е. при слабом поглощении света $\alpha^*d < 1$ (α^* – коэффициент поглощения, d – толщина пленки) градиенты концентраций

неравновесных носителей заряда и поток биполярной диффузии направлены не по световому потоку, а против него, вследствие чего знак демберовского $V_{\text{АФН}}$ аномален. Если, однако, от возбуждения длинноволновым светом перейти в область коротких волн, то вследствие увеличения коэффициента поглощения генерация электронно-дырочных пар будет происходить только вблизи освещенной поверхности, направление потока биполярной диффузии станет независимым от скорости поверхностной рекомбинации и вместо аномального дембер-эффекта, имеющего место на длинных волнах, возникнет нормальный дембер-эффект. Следовательно, если АФН эффект обусловлен демберовским механизмом, то при возбуждении пленки достаточно коротковолновым светом возникает инверсия знака. Напротив, при p - n -переходном механизме величина $V_{\text{АФН}}$ (β) должна оставаться неинверсионной в условиях коротковолнового фронтального возбуждения.

Таким образом, комбинация угловых и спектральных измерений дает однозначный ответ на вопрос о природе микрофотоэлементов в АФН пленках [1, 6–10].

Полученные данные позволяют считать, что в пленках Ge , Si , InAs , Al_2Se_3 , GaAs , PbS природа АФН-эффекта демберовская (фотодиффузионная), а в пленках CdSe , CdTe и халькогенидных сплавов p - n -переходная (фотовольтаическая).

2. РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ АФН-ЭФФЕКТА

С момента обнаружения эффекта прошло около 70 лет, однако до сих пор нет единого взгляда на его природу. Автор настоящего сообщения обратил внимание на работы [2, 3], в которых высказывается предположение, что границы кристаллитов (ГК) в пленках могут быть причиной анизотропного поглощения света их объемом. В одном случае считается, что диэлектрические прослойки на ГК отражают свет, внося неравномерность в поглощение света; в другом – отражение происходит из-за того, что соседние кристаллиты имеют различное кристаллографическое строение, например кубическое и гексагональное, и вновь ГК способна отражать свет. Об анизотропии поглощения света металлическими пленками сообщалось в работе.

Известно, что пленки, обладающие АФН, обычно, получают термовакuumной конденсацией вещества на диэлектрические подложки (например, стекло). Такие пленки непрерывно растут в направлении молекулярного пучка и имеют столбчатую структуру. Изменение направления молекулярного пучка, например, путем изменения положения подложки – напылением на подложки, плоскость которых не перпендикулярна молекулярному пучку (косое напыление), ведет к точно такому же изменению

направления непрерывного роста пленок. Прекрасные микрофотографии, иллюстрирующие особенности роста пленок PbS , приведены в работах [6, 7], аналогичные иллюстрации существуют и для пленок других полупроводников и металлов.

Сказанное свидетельствует, что плоскость ГК при термовакuumной конденсации пленок ориентирована в направлении молекулярного пучка. Более того, то же самое может происходить при получении пленок химическим осаждением из раствора, например, сверхпроводящие керамики имеют точно такую структуру. Столбообразный рост поликристаллических пленок легко понять, если принять во внимание тот факт, что формирование структуры пленок всегда происходит под жестким требованием минимальности свободной энергии. В данном случае это соответствует стремлению структуры в процессе роста иметь либо минимальную общую поверхность всех кристаллитов либо, что, по-видимому, точнее, кристаллит ограняет себя плоскостями с наименьшей поверхностной энергией, так что сумма произведений площадей поверхности на их поверхностную энергию оказывается минимальной.

Второй момент, требующий разъяснений, – это природа ГК. Обычно в поликристаллических пленках ГК представляют собой совокупность дислокаций (дислокационная стенка или дислокационная сетка), которые образуются вследствие разориентации соседних кристаллитов. Чем больший угол образуют между собой кристаллиты, тем меньшим должно быть расстояние между дислокациями. Это означает, что одним рядом дислокаций может быть образована ГК, которая разделяет кристаллиты, повернутые на угол не более нескольких градусов (что обычно и имеет место в поликристаллических пленках, растущих на ориентирующих подложках). При большом угле взаимного поворота кристаллитов (например, при росте пленок на аморфных подложках), дислокации на ГК, сблизившись, практически сливаются и теряют индивидуальность. Здесь, по-видимому, можно говорить об индивидуальности поверхности каждого кристаллита, образующего ГК, о чем свидетельствует высокая адсорбционная активность ГК, релаксационные явления на ГК, обуславливающие пики внутреннего трения и затухания ультразвука в поликристаллах, оптическая анизотропия металлических пленок.

Экспериментально подтверждено, что поверхность каждого кристаллита на ГК «шероховата» [7, 11]. Это так называемый рельеф «естественной шероховатости», который также обусловлен требованием минимальности свободной энергии. Шероховатости могут быть и причиной возникновения на ГК ПС.

Коль скоро в рассмотрение вводится понятие индивидуальности поверхности кристаллита на

ГК, в оптических явлениях мы должны учитывать особенности прохождения света через ГК, в частности, ее отражательную способность. Шероховатости на ГК и могут быть первопричиной их такой способности. Сказанное проиллюстрировано на рис. 1.

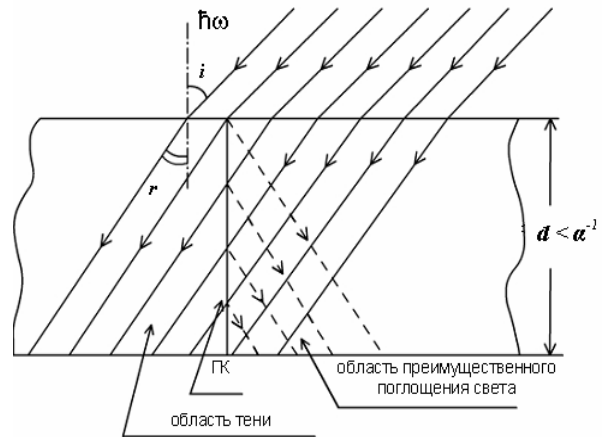


Рис. 1 Поглощение плоскопараллельного пучка света, падающего под углом i к пленке, полученной в условиях падения молекулярного пучка перпендикулярно плоскости подложки. r – угол преломления; d – толщина пленки; α – коэффициент поглощения света. Положено, что коэффициент преломления на ГК не претерпевает изменений.

Основной результат, следующий из рис. 1 – это неоднородность в поглощении света объемом пленки, которую вносит ГК, из-за отражения на ней падающего света. Симметрия, которая имеет место при нормальном падении светового пучка, нарушается при освещении под углом к поверхности и ведет к образованию областей преимущественного поглощения света и тени. Это является одной из естественных причин возникновения в таких структурах АФН. Луч, проникающий в область тени через ГК, имеет интенсивность ниже интенсивности первичного луча, прошедшего в пленку.

3. ПРИМЕНЕНИЕ АФН - ПРИЕМНИКОВ

В оптоэлектронных устройствах на основе излучателя и приемника АФН-приемник используется как первичный преобразователь, преобразующий оптический сигнал в электрический. Получаемый при этом электрический сигнал в виде напряжения регистрируется или поступает в электронные схемы, осуществляющие его переработку и выделение из него параметра, несущего информацию об измеряемой величине. При этом преобразованный сигнал поступает на измерительный прибор, градуируемый в значениях измеряемой величины X [15].

Если рассмотреть математическую модель АФН-приемника, то он является функцией многих переменных: светового потока Φ , спектрального состава оптического излучения L ;

температуры T и влажности B :

$$u_{\Phi} = f(\Phi, T, L, B) \quad (1)$$

Если рассматривать зависимость фотонапряжения на выходе АФН-приемника от времени, выражению (1) можно придать вид:

$$u_{\text{тм}} = S_0(B, T) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{a_k(x_1, x_2, \dots, x_m)}{\sqrt{1 + (k\omega\tau)^2}} \sin k\omega\tau \sum_{n=0}^{\infty} S_{\lambda n} \Phi_{\lambda n}(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (2)$$

где: a_k – относительная амплитуда k -й гармонической составляющей светового потока на входе АФН-приемника; $\infty = 2\pi/T_0$ – круговая частота (T_0 – период повторения входного сигнала); τ – постоянная времени АФН-приемника; S_0 – абсолютная чувствительность АФН-приемника к излучению с длиной волны λ_0 ; $S_{\lambda n}$ – относительная чувствительность фотоприемника к излучению на длине волны λ_n (отношение к S_0); $\Phi_{\lambda n}$ – световой поток с длиной волны λ_n , поступающий на фотоприемник; $x_1, x_2, \dots, x_m$ – всевозможные параметры, влияющие на величину светового потока и на его гармонический $\sum a_k$ состав.

В целом, оптоэлектронные устройства с применением АФН-приемников можно использовать в контрольно-измерительной технике в качестве параметрического измерительного преобразователя неэлектрических величин, таких как плотность, влажность, координаты движущихся объектов, цвет, жирность молока и молочных продуктов, концентрация, уровень и т. д.

Одним из важных аспектов применения АФН-приемников является использование их в качестве ПОИ в волоконно-оптической связи.

Следует отметить, что применение, АФН-приемников в качестве АПОИ открывает широкие возможности в разработке миниатюрных измерительных устройств для контроля различных физических параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптоэлектронные первичные преобразователи с применением АФН-приёмников в качестве автономного ПОИ открывают широкие возможности в области разработки контрольно-измерительных устройств физико-химических параметров веществ и материалов, что целиком и полностью подтверждается имеющимся к настоящему времени значительным опытом применения АФН-приёмников в этом плане.

Расширение сфер и объема применения АФН-приёмников для автоматизации производственных процессов связано с развитием технологии получения АФН-плёнок, совершенствованием их применения в качестве ПОИ, а также развитием метрологии и светотехники. В первую очередь здесь следует отметить применимость АФН-приёмников в ка-

честве координатно-чувствительного и двумерного координатно-чувствительного ПОИ для определения координат источника светового излучения в электронных и робототехнических устройствах.

Очень интересным и перспективным является применение АФН-приёмников в качестве автономного ПОИ для волоконно-оптической связи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Фотоэлектрические явления в полупроводниках и оптоэлектроника / Под ред. Э.И. Адировича. – Ташкент: ФАН, 1972. С. 143–229
- [2] Starkirkiewics J., Sosnovski L., Simpson O. Photovoltaic effect exhibited in Highjresletance Semiconducting Films / Nature, 1946. Vol. 158, P. 28.
- [3] Берлага Р.Я., Руми М.А., Стрехов Л.П. «Возникновение» ЭДС при освещении сернисто-свинцовых фотосопротивлений / ЖТФ, 1954. Т. 24, в. 5. С. 943.
- [4] Scawade G. – Zs. für Naturforschung, 1955. Vol. 10. P. 78.
- [5] Piwowski B.T. PbSe and PbTl infra red detectors / Acta Phys. Pol., 1956. Vol. 15, № 4. P. 271–274.
- [6] Мастов Э.М. Исследование аномального большого фотомагнитного эффекта в пленках теллурида кадмия: дис. канд. физ.-мат. наук. – Ташкент, 1972. – 125 с.
- [7] Юабов Ю.М. Полупроводниковые пленки с аномально большим фотонапряжением: дис. канд. физ.-мат. наук. – Ташкент, 1965. – 90 с.
- [8] Мирзамахмудов Т. Исследование АФН эффекта в полупроводниковых пленках с узкой запрещенной зоной: дис. канд. физ.-мат. наук. – Ташкент, 1971. – 125 с.
- [9] Шакиров Н. Кинетика и характеристические времена АФН-эффекта в полупроводниковых пленках с микро p - n -переходами: дис. канд. физ.-мат. наук. – Ташкент, 1970. – 180 с.
- [10] Найманбаев Р. Исследование фотоэлектрических свойств АФН-пленок теллурида кадмия и трехселенистой сурьмы и разработка на их основе оптоэлектронных приборов: дис. канд. физ.-мат. наук. – Ташкент, 1977. – 126 с.
- [11] Любин В.М., Федорова Г.А. Высоковольтные фото-ЭДС в слоях трехселенистой сурьмы / ФТТ, 1962. Т. 4, № 8. С. 2027–2030.
- [12] Найманбаев Р., Маманов О. Применение АФН-фотоприемников в качестве первичных преобразователей информации / УзФЖ, 1993. № 6. С. 30.
- [13] Эргашев Ж. Исследование фотоэлектретных свойств полупроводниковых пленочных структур с микро- p - n -переходами: дис. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук. – Вильнюс, 1981. – 120 с.

- [14] Рахимов Н.Р. Исследование фотоэлектрических свойств АФН-пленок теллурида кадмия с серебром и разработка оптоэлектронных приборов на их основе: дис. канд. тех. наук. – Ташкент, 2001. 140 с.
- [15] Рахимов Н.Р, Ушаков О.К. Оптоэлектронные датчики на основе АФН-эффекта. – Новосибирск, 2010г 218 с.



Неъматжон Рахимович Рахимов - д.т.н., профессор кафедры Защиты информации, д.т.н, автор более 250 статей и 30 патентов, трех монографий, НГТУ.
E-mail: nerah@rambler.ru

What does APV means?

Nematzhon RAKHIMOV

Abstract: This paper presents the results of researches of the effects of abnormally high photovoltaic voltage (APV) in the semiconductor film systems. The possibility of using of open channel optical couples for optoelectronic systems based on transmitter and APV-receiver was investigated. On the basis of APV-films new systems for various optoelectronic has been developed.

Key words: APV-films, optoelectronics, scientific information.