

Академик АН КазССР М. И. КОРСУНСКИЙ, М. М. СОМИНСКИЙ, В. М. СМУРЫГИН

О ФОТОМАГНИТНОМ ЭФФЕКТЕ В А.Ф.Н.-ПЛЕНКАХ ТЕЛЛУРИДА КАДМИЯ

1. Известно, что косонапыленные тонкие пленки некоторых полупроводниковых материалов, и в частности теллурида кадмия, при определенных условиях их приготовления способны генерировать при освещении аномально высокие фотонапряжения (а.ф.н.-эффект) вследствие образования в таких пленках последовательного соединения десятков и сотен тысяч отдельных микрофотоэлементов ⁽¹⁾. Вопрос о механизме возникновения фотонапряжения в отдельном элементе микробатареи остается пока не вполне выясненным, однако он может быть сведен к дилемме: вентильный или диффузионный микрофотоэлемент ⁽²⁾.

Недавно Э. И. Адирович, Э. М. Мастов и Ю. М. Юабов, считая доказанным вентильный механизм а.ф.н.-эффекта в теллуриде кадмия, сообщили ⁽³⁾ об измерениях фотомагнитного эффекта (ф.м.э.) в а.ф.н.-пленках этого вещества. Принимая модель с фотопунтом, описывающую а.ф.н.-пленку как ряд последовательно соединенных $(p-n)$ - и $(n-p)$ -переходов, находящихся в неодинаковых условиях освещения и шунтированных фотопроводящей неактивной частью пленки, авторы ⁽³⁾ нашли, что основные характеристики фотомагнитного напряжения холостого хода $V_{ф.м.э.}$ — зависимость от интенсивности света I и напряженности магнитного поля H — соответствуют теоретическим формулам для $(p-n)$ -перехода ⁽⁴⁾. Значения $V_{ф.м.э.}$ достигали 2—5 мВ/э и превышали вольтовую чувствительность холловских магнитометров.

2. Предполагая, что ф.м.э. обусловлен барьерами на $(p-n)$ - и $(n-p)$ -переходах, фотомагнитное напряжение на которых складывается ⁽⁴⁾, авторы ⁽³⁾, используя связь между $V_{ф.м.э.}$ и H при достаточно больших интенсивностях света

$$V_{ф.м.э.} = \frac{2}{\pi} \frac{kT}{q} N\mu \frac{H}{c}, \quad (1)$$

где μ — эффективная подвижность носителей, q — заряд электрона, N — число $(p-n)$ -переходов, определили подвижность в предположении, что $N = 10^5$, и получили значения μ , по порядку величины совпадающие с величинами, обычно наблюдаемыми в монокристаллах CdTe ⁽⁵⁾. В режиме насыщения η отношение фотомагнитного напряжения к фотонапряжению

$$\eta = \frac{V_{ф.м.э.}}{V_{а.ф.н.}} \simeq \frac{2}{\pi} \frac{\mu H}{c}. \quad (2)$$

Экспериментально полученные в ⁽³⁾ значения η оказались на 1,5—2 порядка больше расчетной величины. Это расхождение было объяснено ⁽³⁾ наличием фотопунта, в десятки раз уменьшающего наблюдаемые величины а.ф.н. Однако такое объяснение ошибочно, поскольку в барьерной модели предполагается, что ф.м.э. возникает вследствие дополнительного разделения носителей в присутствии магнитного поля на $(p-n)$ - и $(n-p)$ -переходах, генерирующих а.ф.н., т. е. при шунтировании барьеров измеряемая величина $V_{ф.м.э.}$ должна оказаться заниженной в точно такой же степени, как и $V_{а.ф.н.}$ и их отношение (2) сохранится неизменным. Невыполнение соотношения (2) позволяет предполагать, что либо ф.м.э., так же как и

а.ф.н.-эффект в теллуриде кадмия, не барьерный, либо ф.м.э. и а.ф.н. возникают в разных частях микроэлемента. Как было показано в (6), температурная зависимость фотопроводимости пунта является экспоненциальной, что можно объяснить наличием в фотошунте барьеров с высотой около 0,2 эв. Не принимая участия в образовании а.ф.н.-эффекта (6), эти барьеры могут давать заметный вклад в ф.м.э.

3. При фотодиффузионном механизме фотомагнитное напряжение (4)

$$V_{\text{ф.м.э.}} = \frac{N g g_0 d (\mu_n + \mu_p) H}{\sigma (1 + s/s_d + s_d/D) c}, \quad (3)$$

где σ — световая проводимость образца, g_0 — скорость генерации, d — толщина слоя, s и s_d — скорости поверхностной рекомбинации на освещенной и темновой поверхностях соответственно, D — коэффициент диффузии, т. е. в этом случае $V_{\text{ф.м.э.}}$, так же как и в $(p-n)$ -переходе, пропорционально H . Если ф.м.э. возникает в активной части пленки, то может наблюдаться одновременное насыщение $V_{\text{ф.м.э.}}$ и $V_{\text{а.ф.н.}}$ с интенсивностью света I , т. е. при этом измеряемая величина $V_{\text{ф.м.э.}}$, так же как и $V_{\text{а.ф.н.}}$, связана с отношением проводимости фотошунта и активной части микроэлемента (6).

Таким образом, основные характеристики ф.м.э. в демберовской модели такие же, как и в барьерной модели и какие были найдены в теллуриде кадмия авторами (3).

4. Представляется возможным сделать более определенные выводы о механизме генерации а.ф.н.-эффекта на основе рассмотрения поведения ф.м.э. при изменении направления освещения а.ф.н.-пленки.

Рассмотрим поведение в магнитном поле активной части микрофотоэлемента в трех различных случаях при противоположных направлениях освещения, как показано на рис. 1.

а) В $(p-n)$ -переходе магнитное поле отклоняет носители, диффундирующие в глубь образца к $(p-n)$ -переходу, увеличивая или уменьшая функцию собирания фотоносителей в зависимости от направления магнитного поля. При этом $V_{\text{ф.м.э.}}$ направлено так же, как $V_{\text{а.ф.н.}}$ и алгебраически складывается с ним. При изменении направления освещения на противоположное поток диффузии неосновных носителей вдоль плоскости $(p-n)$ -перехода направлен в обратную сторону и знак $V_{\text{ф.м.э.}}$ меняется на противоположный (рис. 1а).

б) В демберовском микроэлементе, в случае преобладания объемной рекомбинации и сильно поглощаемого света, поток фотоносителей направлен от освещенной грани к темновой. В присутствии магнитного поля отклонение диффундирующих носителей приводит к возникновению $V_{\text{ф.м.э.}}$ в направлении, перпендикулярном демберовскому напряжению.

Очевидно, что и в этом случае ф.м.э. меняет знак при тыловом освещении.

в) В случае преобладания поверхностной рекомбинации, когда скорость рекомбинации на одной из граней микроэлемента большая (например, $s_d \gg s$, рис. 1в), в слабопоглощаемом свете поток диффузии фотоносителей направлен к этой грани независимо от направления освещения (аномаль-

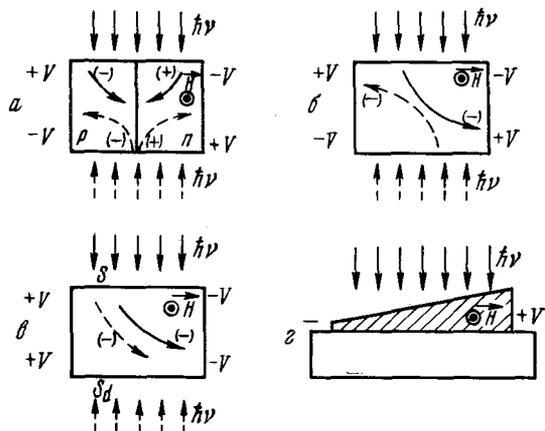


Рис. 1. Полярность $V_{\text{ф.м.э.}}$ при различных направлениях освещения в случаях: $(p-n)$ -перехода (а), нормального эффекта Дембера (б, в), а.ф.н.-слой в магнитном поле (г)

ный эффект Дембера) и знак ф.м.э. остается неизменным при тыловом освещении образца. При достаточно сильном поглощении (коротковолновый свет) или на относительно более толстых образцах направление диффузии носителей и соответственно фотоманнитного эффекта могут измениться и в этом случае.

Таким образом, изменение знака ф.м.э. при перемене направления освещения может наблюдаться при любом механизме возникновения а.ф.н.-эффекта, однако сохранение одной и той же полярности сигнала ф.м.э. при фронтальном и тыловом освещении образца однозначно свидетельствует об аномальном демберовском механизме генерации а.ф.н.-эффекта.

5. Слои теллурида кадмия толщиной от 0,03 до 1,6 μ наносились термическим испарением на подложки из полированного плавленого кварца размерами 10×20 мм² с предварительно нанесенными золотыми электродами. Криостат, аналогичный описанному в (7), помещался в зазор электромагнита постоянного тока с максимальной напряженностью 2 кэ, при этом образец находился в магнитном поле, параллельном поверхности пленки и перпендикулярном линии, соединяющей электроды (рис. 1з). Ф.м.э. считался положительным, если при направлении магнитного поля, показанном на рис. 1з, знак плюс соответствовал толстому концу пленки. Измерения проводились в схеме компенсации электрометром типа ЕК 6-7 с точностью 10^{-14} а. Толщина образцов измерялась на интерферометре МИИ-4.

Таблица 1

Образец	Освещение				Толщина слоя, μ
	фронтальное		тыловое		
	$i_{a.ф.н.}$	$i_{ф.м.э.}$	$i_{a.ф.н.}$	$i_{ф.м.э.}$	
62	-125	-1	-105	-1	0,21
63	-52	0	-34	-2	0,14
67	-3	-0,3	-5,6	-0,05	0,03
83	-86	+7	+26	-4	0,27
84	-44	+9	+15,5	-4	0,28
91	+280	+50	+360	+15	0,11
92	+1330	+100	+1000	-200	1,60
94	+42	+13	-34	-14	0,73
95	+690	+60	+560	+10	0,25

В табл. 1 приведены значения токов короткого замыкания ($i \cdot 10^{12}$ а) а.ф.н.-эффекта и ф.м.э. для 9 образцов при освещении белым светом интенсивности 10^4 лк со стороны напыленного слоя и сквозь подложку. Как видно из табл. 1, у образцов №№ 62, 63, 67, 91, 95 знак ф.м.э. не меняется при изменении направления освещения. На образцах №№ 83, 84 и 94 изменилась полярность ф.м.э. и а.ф.н.-эффекта. При фронтальном освещении образца № 63 в пределах точности измерений ф.м.э. не обнаружен. Образец № 92 не менял полярности $V_{a.ф.н.}$ при освещении со стороны подложки, однако знак $V_{ф.м.э.}$ при этом изменился.

Отметим, что сохранение полярности ф.м.э. наблюдается, как правило, на относительно тонких образцах, слабо поглощающих белый свет. Изменение направления потока диффузии в более толстых образцах приводит к смене знака а.ф.н. и ф.м.э. Изменение знака ф.м.э. при неизменной полярности а.ф.н. наблюдалось только на образце № 92 толщиной 1,6 μ .

6. Исследования температурной зависимости ф.м.э. в различных образцах показывают, что ток короткого замыкания ф.м.э. меняется иначе, чем $i_{a.ф.н.}$. Отношение $V_{ф.м.э.}$ к $V_{a.ф.н.}$ на большинстве образцов уменьшается в несколько раз (на некоторых образцах более, чем на порядок) при охлаждении образца от $+20^\circ$ до -50° С. Это подтверждает сделанное выше пред-

положение о том, что ф.м.э. и а.ф.н.-эффект не обязательно следует связать с одним и тем же элементом эквивалентной схемы микрофотоэлемента а.ф.н.-слоя (⁶). По-видимому, значительный вклад в общую величину ф.м.э. могут давать барьеры шунтирующей прослойки. Кроме того, поскольку $V_{\text{ф.м.э.}}$ возникает в демберовском микроэлементе в направлении, перпендикулярном $V_{\text{а.ф.н.}}$, то условия шунтирования ф.м.э., а также механизм его суммирования по всем микрофотоэлементам пленки могут быть иными, чем для а.ф.н.-эффекта.

Таким образом, одновременные наблюдения ф.м.э. и а.ф.н.-эффекта в пленках теллурида кадмия позволяют на некоторых образцах непосредственно показать, что ответственным за возникновение $V_{\text{а.ф.н.}}$ и $V_{\text{ф.м.э.}}$ является аномальный эффект Дембера.

Институт ядерной физики
Академии наук КазССР
Алма-Ата

Поступило
15 VI 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Э. И. Адирович, В. М. Рубинов, Ю. М. Юабов, ДАН, 164, № 3, 529 (1965).
² Э. И. Адирович, В. М. Рубинов, Ю. М. Юабов, ДАН, 168, № 5, 1037 (1966).
³ Э. И. Адирович, Э. М. Матов, Ю. М. Юабов, ДАН, 188, № 6, 1254 (1969).
⁴ Ю. И. Равич, Фотомагнитный эффект в полупроводниках и его применение, М 1967. ⁵ D. de Nobel, Phil. Res. Rep., 14, 361 (1959). ⁶ М. И. Корсунский, М. М. Соминский, Изв. АН КазССР, сер. физ.-матем., № 2, 59 (1970). ⁷ H. Kessler, Rev. Sci. Instr., 6, 376, 517 (1966).