

АКУСТОЭЛЕКТРОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В Те И CdS В СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Степуренко А. А., Алиев К. М., Абакарова Н. С.

Исследованы вольтамперные характеристики пьезополупроводниковых кристаллов с сильно выраженной анизотропией электрических и акустоэлектрических свойств (Те и CdS) в сильно продольном и поперечном магнитных полях $(\mu H/c)^2 > 1$ в условиях акустоэлектронного взаимодействия.

Показано, что в некотором интервале продольного и поперечного магнитных полей независимо от ориентации образцов относительно прикладываемого электрического поля происходит уменьшение на восходящей ВАХ порогового электрического поля акустоэлектронного взаимодействия (АВ) с последующим его ростом при дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля.

Сильное продольное и особенно поперечное магнитные поля уменьшают амплитуду акустоэлектрических осцилляций, приводя к полному их исчезновению.

Известно, что внешнее магнитное поле, поперечное электрическому току, проходящему через кристалл, вызывает изменение сопротивления образца. Эффект магнитосопротивления есть непосредственный результат того, что в магнитном поле электропроводность становится тензором. В изотропной модели продольное магнитосопротивление $\Delta \rho_{11}/\rho_0$ должно быть равно нулю. Однако для многих полупроводниковых кристаллов, обладающих анизотропией эффективных масс, времен релаксаций и других параметров, продольное магнитосопротивление не равно нулю, а имеет тот же порядок величины, что и поперечное магнитосопротивление.

В пьезополупроводниковых кристаллах теллура и сульфида кадмия, для которых характерны не только анизотропия гальваномангнитных коэффициентов, но и сильная анизотропия пьезоэффекта, вследствие этого и акустоэлектронного взаимодействия (АВ) изменение параметров этого взаимодействия (инкремента усиления, скорости звука, времени развития, амплитуды акустоэлектрических осцилляций) может быть вызвано не только поперечным магнитным полем, но и продольным. Теоретическим исследованиям влияния поперечного магнитного поля на акустоэлектронное усиление в пьезополупроводниках посвящен ряд работ [1, 2]. Приложением соответствующим образом магнитного поля экспериментально воссоздана пространственная анизотропия акустоэлектронного взаимодействия в кристаллах теллура [3, 4]. Увеличение инкремента нарастания и усиление акустоэлектрических осцилляций тока в пьезоэлектрически активных полупроводниках группы $A^{III}B^V$ и в теллуре получены с помощью поперечного магнитного поля [3, 5, 6]. Сделана попытка исследовать влияние продольного магнитного поля на генерацию фононов в теллуре в работе [7], где, вообще-то говоря, условие квазистационарности магнитного поля выполняется недостаточно, длительность прикладываемого к образцу импульса электрического поля приводит к многопролетному АВ, что не дает возможности проследить за изменением того или иного параметра АВ.

Целью данной работы являются экспериментальные исследования вольтамперных характеристик (ВАХ) образцов кристаллов Те и CdS (для которых характерна сильно выраженная анизотропия АВ) в электрических полях, достаточных для того, чтобы дрейфовая скорость носителей превышала скорость

звуковой волны, при наличии импульсного продольного ($E \parallel H$) и поперечного ($E \perp H$) магнитных полей до 250 кЭ, когда условие сильного магнитного поля $(\mu H/c)^2 > 1$ выполняется при температуре 77 К.

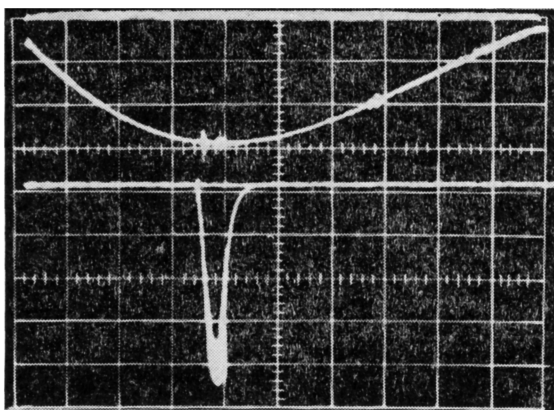


Рис. 1. Осциллограммы импульсов электрического (нижний) и магнитного (верхний) полей.

Во избежание джоулева нагрева ВАХ образцов исследовались приложением импульсного электрического поля. Для непосредственной записи ВАХ использовались треугольные импульсы напряжения длительностью 12 мкс.

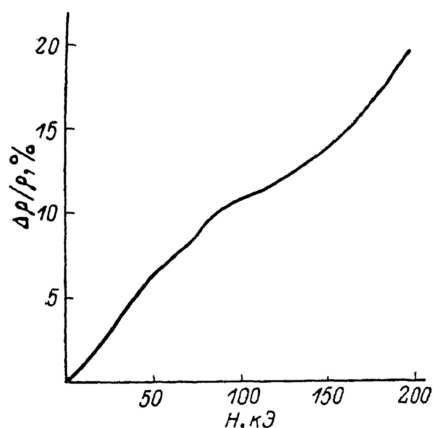


Рис. 2. Магнитосопротивление образца Те в сильном магнитном и слабом электрическом полях.

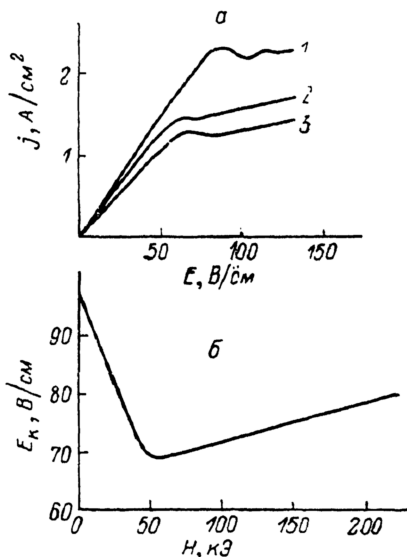


Рис. 3. ВАХ образца Те в магнитном поле различной величины (а); зависимость критического электрического поля АВ от величины магнитного поля (б) ($Z \parallel E \parallel H$).

а) H , кЭ: 1 — 0, 2 — 50, 3 — 175.

Формирователь импульсов напряжения с малым выходным сопротивлением позволял плавно менять амплитуду и длительность импульсов. Импульсные магнитные поля (до 250 кЭ), прикладываемые в эксперименте, создавались в цельноточенном из берилловой бронзы соленоиде с внутренним диаметром 10 мм. Длительность импульса магнитного поля составляла $\tau_m = 175$ мкс. Генератор импульсов электрического поля запускался синхронно с импульсом магнитного поля, причем измерительная установка позволяла сканировать

импульсом электрического поля по импульсу магнитного с точностью до 1 мкс, а соотношение длительности импульсов E и H удовлетворяло условию квазистационарности магнитного поля (см. рис. 1, где приведена развертка H при 200 кЭ). Время развертки равно 5 мкс/дел. Кроме того, установка позволяла производить прямую запись продольного $\Delta \rho_{\parallel}/\rho_0$ и поперечного $\Delta \rho_{\perp}/\rho_0$ магнитосопротивлений в сильном магнитном и слабом электрическом полях (рис. 2).

Были исследованы низкоомные ($\sigma_0 = 0.1 - 1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$) кристаллы Te и CdS . Ориентация образцов теллура была такова, что направление электрического поля совпадало с направлением кристаллографических осей. Образцы имели форму параллелепипеда с характерными размерами $0.7 \times 0.2 \times 0.2 \text{ см}$. Индиевые контакты наносились на дальние грани. Измерения проводились в темноте при температуре 77 К. Отбирались такие образцы, ВАХ которых были нелинейны за пороговым электрическим полем E_k вследствие акустоэлектронного взаимодействия.

Отдельно исследовались восходящие ветви ВАХ (динамика), позволяющие учитывать переходные процессы и влияние магнитного поля на характерное время инкубации установления АВ.

На рис. 3, а представлены результаты исследований влияния сильного продольного магнитного поля ($E \parallel H \parallel Z$) на динамическую восходящую ВАХ образцов кристалла теллура. Видно значительное уменьшение тока на нелинейном участке, при этом в магнитном поле порядка 50 кЭ неустойчивость тока подавляется, и с дальнейшим ростом магнитного поля осцилляции больше не возникают. Видно также, что при напряженности магнитного поля 50 кЭ пороговое электрическое поле резко падает, с дальнейшим ростом магнитного поля падение порогового поля прекращается, и уже при магнитном поле более 100 кЭ пороговое электрическое поле начинает расти. На рис. 3, б показан график зависимости порогового электрического поля E_k от величины напряженности магнитного поля.

Аналогичные исследования ВАХ неориентированных кристаллов CdS в продольных магнитных полях ($E \parallel H$) показали, что токовые осцилляции подавляются в магнитных полях 150 кЭ и проявляется значительный эффект магнитосопротивления. Пороговая зависимость $E_k(H)$ для CdS подобна случаю Te и имеет колоколообразный вид с характерным минимумом, а в скрещенных полях ($E \perp H$) ВАХ кристаллов CdS проявляют значительное уменьшение тока в неомической области с ростом величины магнитного поля, осцилляции тока подавляются уже в полях ~ 50 кЭ, и пороговое электрическое поле резко уменьшается. С дальнейшим ростом магнитного поля замечено более плавное уменьшение порогового электрического поля, а в магнитных полях 200 кЭ E_k снова возрастает и пороговая зависимость ($E_k \sim H$) качественно аналогична описанным выше.

Для объяснения экспериментальных результатов можно предложить следующие механизмы. Магниторезистивный эффект, проявляющийся в кристаллах CdS и Te с резкой анизотропией электрических и акустических свойств, должен приводить к росту порогового электрического поля АВ за счет уменьшения подвижности, однако одновременно увеличивается время диффузионного рассасывания электронного сгустка с концентрацией n_c $\tau_{Dn_c} = 1/Dn_c^2$ [8], где $D = \mu kT/e$ — коэффициент диффузии. Размытость электронного сгустка в поле акустической волны уменьшается, когда собирание электронов в сгустки происходит быстрее, чем рассасывание его за счет диффузии, что приводит к увеличению числа электронов в сгустке (наблюдается значительное уменьшение тока в неомической области ВАХ) и тем самым к росту коэффициента усиления акустических волн [8]

$$\alpha = \frac{K^2 \omega_s (\gamma/f)}{(\gamma/f)^2 + 4\omega_s/\omega_D}$$

где K^2 — коэффициент электромеханической связи, $\omega_s = \sigma/\epsilon$ — частота максвелловской релаксации, $\omega_D = ev_s^2/\mu kT$ — частота диффузионного смещения, $\sigma = en\mu$ — проводимость, $\gamma = (v_d/v_s - 1)$ — параметр усиления, v_d — дрейфовая скорость носителей, v_s — скорость звука,

$$f = \frac{1 + (\mu H/c)^2 \cos^2 \theta}{1 + (\mu H/c)^2},$$

θ — угол между направлением магнитного поля H и направлением акустического потока; $f \neq 1$ при $E \parallel H$, так как акустический поток распространяется не только вдоль образца. Вследствие анизотропии АВ спонтанная генерация акустического шума может обусловить такие внесосевые направления распространения, которые дают максимальное усиление. Влияние магнитного поля на генерацию фононов в этих направлениях будет определяться множителем $\cos^2 \theta$, к которому величина f особенно чувствительна при $(\mu H/c)^2 \gg 1$. Поскольку время формирования АВ τ_ϕ (время, требующееся для того, чтобы полный начальный поток вырос до уровня, при котором он может вызвать обнаруживаемое уменьшение омического тока) и коэффициент усиления α связаны соотношением [9]

$$\tau_\phi = \frac{\ln(enE/20\alpha W_0)}{2av_s},$$

где $W_0 = (1/2\pi)^3 (S/l) (\omega_M/v_s)^3 (\Delta\omega/\omega_M) kT$ — плотность тепловой энергии акустических фононов в окрестности ω_M , S — сечение, l — длина образца, τ_ϕ будет уменьшаться с ростом α , что экспериментально подтверждено в [3]. Это приводит к уменьшению порога АВ, которое превалирует над увеличением за счет магниторезистивного эффекта. Однако дальнейшее уменьшение подвижности с ростом магнитного поля приводит к тому, что сгусток электронов выходит из синхронизма с акустической волной и коэффициент усиления уменьшается. Преобладающим механизмом становится магниторезистивный эффект, приводящий к росту порога АВ.

Наряду с этим отклонение направления тока в магнитном поле от направления движения акустических волн приводит к уменьшению концентрации носителей, захватываемых пьезополями, сопровождающими акустическую волну, $n_{\text{эфф}} = n_0 \cos \arctg(\mu H \cos \theta/c)$, оно проявляется в подавлении акустоэлектрических неустойчивостей в магнитном поле.

Итак, общим для влияний поперечного и продольного магнитных полей на АВ вследствие его анизотропии в Те и CdS является качественная общность. Свободная ориентация кристаллов относительно электрического поля в магнитном поле приводит к тем же качественным результатам.

Список литературы

- [1] Steele M. L. // RCA Rev. 1967. V. 28. N 1. P. 58—63.
- [2] Abe Y., Mikoshiba N. // Japan. J. Appl. Phys. 1960. V. 7. N 3. P. 881—892.
- [3] Степуренко А. А. // Автореф. канд. дис. Махачкала, 1982.
- [4] Zhochoy V. Z., Stepurenko A. A., Pustovoyt V. J., Mazur M. M. // Phys. St. Sol. (a). 1981. V. 65. N 2. P. 491—496.
- [5] Брай Р., Долэ В., Росс Дж. Б. // Тр. IX Межд. конф. по физике полупроводников. М., 1968. Т. 2. С. 972—977.
- [6] Кизучи М., Хаякова Х. // Тр. Межд. конф. по физике полупроводников. М., 1968. Т. 2. С. 992—995.
- [7] Баширов Р. И., Пустовойт В. И., Жохов В. З., Либерман Н. Н., Пышненко Т. С. // ФТТ. 1988. Т. 30. В. 10. С. 3129—3131.
- [8] Бачинин Ю. Г., Гуляев Ю. В. // ФТТ. 1973. Т. 15. В. 4. С. 1026—1035.
- [9] Горлей П. Н., Радченко В. С., Шендеровский В. А. Процессы переноса в теллуре. Киев, 1987. 280 с.