

УДК 534.286

К МЕТОДИКЕ ИЗМЕРЕНИЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЗАТУХАНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В ПЬЕЗОПОЛУПРОВОДНИКАХ

Р. П. ВАРДАПЕТЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 25 июня 1983 г.)

Исследовано влияние освещения на прохождение ультразвука в высокоомных фотопроводящих кристаллах GdS . Показано, что при больших уровнях освещенности вследствие уменьшения скорости ультразвука уменьшается резонансная частота, соответствующая максимальному прохождению волны через кристалл. Это приводит к необходимости учета двух связанных с измерениями эффектов: 1) при работе на фиксированной частоте в значение коэффициента фоточувствительного поглощения необходимо ввести поправку, связанную с «уходом частоты»; 2) в зависимости от частоты ультразвука при освещении можно наблюдать как ослабление, так и усиление ультразвука.

В в е д е н и е

Бурное развитие акустоэлектроники как самостоятельной части физики полупроводников связано с наблюдением Хатсоном, Мак-Фи и Уайтом [1] усиления ультразвука в кристалле CdS дрейфовым электрическим полем. Эта работа основана на обнаруженной в [2—4] сильной зависимости затухания ультразвука в CdS от проводимости, изменяемой освещением кристалла, причем в одних образцах освещение увеличивало затухание (по сравнению с темновым), а в других — уменьшало. Вскоре после этого Дрансфельд [5] наблюдал прохождение коэффициента фоточувствительного затухания ультразвука (ФЗУ) в CdS через максимум при изменении интенсивности освещения. Эти наблюдения вместе с обнаружением сильного пьезоэффекта в CdS и ZnO [6] привели Хатсона и Уайта [7, 8] к разработке теории акустоэлектрических явлений в пьезополупроводниках.

В работах [9, 10] при исследовании ФЗУ в CdS была обнаружена сильная зависимость знака эффекта от частоты ультразвука: в одном и том же кристалле на одних частотах (в диапазоне 1—20 мГц) свет ослаблял ультразвук, а на других, отличающихся на несколько кГц, — усиливал. Рассмотрим подробнее это явление и, в частности, его влияние на точность измерения коэффициента ФЗУ.

1. Акустические характеристики образца

В непрерывном методе возбуждения колебаний используются механические резонансные свойства составного резонатора в виде исследуемого образца с плоско-параллельными торцами, на которые приклеены преоб-

разователи ультразвука. Анализ распространения нормальных волн в таком образце проведен в [11] на основе теории длинных передающих линий с затуханием [12].

Если с одного торца образца длиной $L = d/2$ возбудить колебания, то вдоль образца будет распространяться плоская волна

$$u_0 \exp(-\alpha_0 x) \exp\{i(\omega t - k_0 x)\}. \quad (1)$$

При сравнительно малом затухании ($\alpha_0 d \ll 1$) в результате многократных отражений от торцевых поверхностей интенсивность колебаний периодически при $k_0 d = 2\pi n$ (n нумерует гармоники) возрастает, что свидетельствует о возникновении механических резонансов с частотами

$$\omega_0(n) = 2\pi n v_0 / d. \quad (2)$$

Здесь v_0 и α_0 — скорость и коэффициент затухания при равновесной (темновой) концентрации свободных электронов.

В области механического резонанса амплитуда сигнала на преобразователе имеет вид лоренцевской кривой [11]

$$A_0(\omega) \simeq \frac{(\alpha_0 d)^{-1}}{1 + \left(\frac{\omega_0 - \omega}{\alpha_0 v_0}\right)^2}. \quad (3)$$

с полушириной $\Delta\omega = \alpha_0 v_0$.

Изменение скорости и коэффициента затухания ультразвука (например при освещении образца) изменяет амплитуду A так, что

$$A(\omega) \simeq \frac{(\alpha d)^{-1}}{1 + \left(\frac{\omega_x - \omega}{\alpha v}\right)^2}, \quad (4)$$

где $\omega_x = 2\pi n v / d$ — новая резонансная частота.

Для исследования частотной зависимости ФЗУ удобно ввести параметр $\eta = \omega / \omega_0$. Тогда выражение (4) примет вид

$$A(\eta) \simeq \frac{\lambda (\alpha_0 d)^{-1}}{1 + [2Q\lambda(1 - \eta)]^2}, \quad (5)$$

где $Q = \omega_0 / 2\alpha_0 v_0$ — добротность резонатора, $\lambda = \alpha_0 / \alpha$ и $\gamma = v_0 / v$ — относительное затухание и относительная скорость ультразвуковых волн в освещенном образце.

Из выражения (5) следует, что при работе входного преобразователя на частоте $\omega = \eta\omega_0$ коэффициент ФЗУ $A(\eta)/A_0(\eta)$ равен не λ , а

$$R(\eta) = \lambda \frac{1 + [2Q(1 - \eta)]^2}{1 + [2\lambda Q(1 - \eta)]^2}. \quad (6)$$

Это приводит к необходимости учета двух связанных с измерениями ФЗУ эффектов.

1. Если частота ультразвука равна ω_0 , а $\gamma \simeq 1$, то $R = \lambda$. В случае, когда изменение скорости ультразвука значительно и γ не равно 1, R меньше λ , т. е. измеряемое на частоте ω_0 затухание α_0/R больше, чем истинное, равное α_0/λ .

2. Для любых разумных значений λ и γ уравнение (6) имеет два решения τ_{12} , при которых $R=1$, т. е. на частотах $\omega_1 = \tau_{12}\omega_0$ и $\omega_2 = \tau_{12}\omega_0$ свет не влияет на прохождение ультразвука. В этом случае амплитуда сигнала на выходе должна меняться только в моменты включения и выключения света. В то же время на частотах $\omega < \omega_1$ и $\omega > \omega_2$ $R > 1$, и при освещении кристалла можно наблюдать усиление ультразвука.

Эти эффекты являются следствием уширения резонансной линии из-за изменения добротности Q на λQ и резко растут в случае высокодобротных резонаторов.

2. ФЭУ в пьезополупроводниках

Экспериментально часто наблюдается ситуация, когда поглощение ультразвука в кристалле исследуется в отсутствии дрейфового электрического поля. Если при этом частота диффузии электронов ω_D больше частоты ультразвука ω и частоты релаксации проводимости ω_σ , то полученные Уайтом [8] выражения для скорости v и коэффициента затухания α пьезоэлектрически активных ультразвуковых волн упрощаются и принимают вид

$$v = (\rho/c)^{1/2} \left[1 + \frac{K^2}{2} \frac{1}{1 + (\omega_\sigma/\omega)^2} \right], \quad (7)$$

$$\alpha = (c/\rho)^{1/2} \frac{K^2}{2} \frac{\omega_\sigma}{1 + (\omega_\sigma/\omega)^2}, \quad (8)$$

где K — коэффициент электромеханической связи, равный 0,155 для продольных волн в CdS , ρ — плотность материала, c — модуль упругости.

При комнатной температуре для кристалла сульфида кадмия $\omega_D \approx 3 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$, так что выражения (7) и (8) верны для частот ультразвука $\omega/2\pi < 500 \text{ МГц}$ и проводимостей $\sigma = \omega_\sigma \epsilon_0 \epsilon < 10^{-3} (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$. Здесь ϵ и ϵ_0 — соответственно диэлектрические проницаемости кристалла и вакуума. Для высокоомных фотопроводящих кристаллов CdS с темновой проводимостью $\sigma_0 < 10^{-10} (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$ $\omega_\sigma < 10^3 \text{ с}^{-1}$. При освещении кристаллов с ростом проводимости растет и ω_σ .

На рис. 1 показано полученное с помощью выражений (5), (7) и (8) изменение формы резонансной кривой механических колебаний составного резонатора при изменении проводимости кристалла. Вследствие значительного поглощения ультразвука фотоэлектронами при освещении резко уменьшаются амплитуда пика и добротность резонатора. При $\sigma > 10^3 \sigma_0$ резонансный пик почти полностью подавляется, а затем, начиная с $\sigma > 10^6 \sigma_0$, вновь восстанавливается, но при этом вследствие уменьшения скорости ультразвука резонансная частота уменьшается и пик смещается влево. Максимальное значение относительного смещения резонансной частоты $\Delta\omega_0/\omega_0 \approx K^2/2$.

На рис. 1 видно также, что при больших уровнях освещенности $R(1) < \lambda$. Такое отклонение измеряемого значения затухания от истинного существенно зависит от Q и резко растет при переходе к высокодобр-

ротным резонаторам, используемым, в частности, в ядерном акустическом резонансе (рис. 2).

На рис. 3 показана частотная зависимость коэффициента ФЭУ в *CdS* при различных значениях проводимости кристалла. Из этого рисунка, как

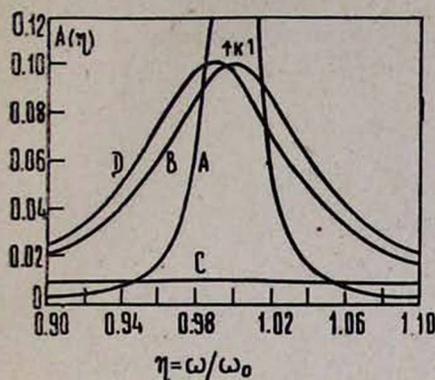


Рис. 1.

Рис. 1. Уширение и сдвиг резонансной частоты кривой механических колебаний кристалла *CdS* при освещении: $Q = 100$, $\omega_0 = 10^6 \text{ с}^{-1}$, $\sigma = 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ (A), 10^{-9} (B), 10^{-8} (C), 10^{-3} (D).

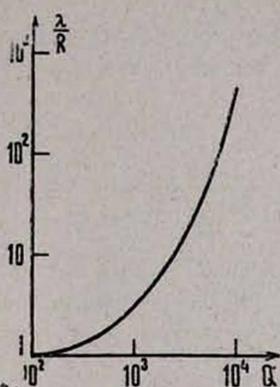


Рис. 2.

Рис. 2. Зависимость величины λ/R от добротности акустического резонатора при $\lambda = 0,1$, $\gamma = 1,01$, $\eta = 1$.

и из рис. 1, следует, что на частотах, несколько отличных от ω_0 , можно наблюдать усиление ультразвука при освещении кристалла. Как и в предыдущем случае, эффект усиления сильно зависит от Q . Так, для $Q = 5000$,

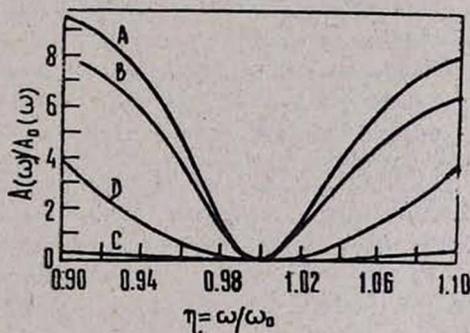


Рис. 3. Зависимость коэффициента ФЭУ от частоты при $\omega_0 = 10^6 \text{ с}^{-1}$, $Q = 100$, $\sigma = 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ (A), 10^{-9} (B), 10^{-8} (D), 10^{-7} (C).

$\lambda = 0,1$ и $\gamma = 1,01$ на частотах $\omega \approx 10^6 \text{ с}^{-1}$ в кристалле *CdS* можно наблюдать усиление ультразвука свыше 60 дБ.

Выводы

1. При измерении сильного ФЭУ в пьезополупроводниках типа *CdS* необходимо каждый раз при изменении освещенности подстраивать ВЧ-генератор для работы на частоте, соответствующей максимальному прохождению ультразвуковой волны через кристалл. При отсутствии возможности изменения частоты необходимо вводить поправку в полученное значение коэффициента ФЭУ согласно формуле (6), положив в ней $\eta = 1$.

Этого недостатка лишены резонансные методы, в которых сам исследуемый образец является источником ультразвуковых колебаний, например, метод свободных колебаний образца [13].

2. В фоточувствительных пьезолупроводниках в зависимости от частоты ультразвука и интенсивности света возможны два режима оптической модуляции интенсивности ультразвука, отличающиеся знаком глубины модуляции $m = (A_0 - A)/(A_0 + A)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hutson A. R., McFee J. H., White D. L. Phys. Rev. Lett., 7, 237 (1961).
2. Gobrecht H., Bartschat A. Z. für Phys., Bd153, 529 (1959).
3. Nine H. D. Phys. Rev., Lett., 4, 359 (1960).
4. Nine H. D., Truell R. Phys. Rev., 123, 799 (1961).
5. Мак-Фи. В кн. «Физическая акустика», под ред. У. Мезона. Изд. Мир, М., 1969, т. IVA, с. 42.
6. Hutson A. R. Phys. Rev. Lett., 9, 296 (1962).
7. Hutson A. R., White D. L. J. Appl. Phys., 33, 40 (1962).
8. White D. L. J. Appl. Phys., 33, 2547 (1962).
9. Дургарян А. А. и др. Изв. АН АрмССР, Физика, 14, 276 (1979).
10. Вардапетян Р. П., Гардилян Р. С., Дургарян А. А. Изв. АН АрмССР, Физика, 17, 286 (1982).
11. Muller J. C., Bolef D. I. J. Appl. Phys., 39, 4589 (1969).
12. Mason W. P. Physical Acoustics and Properties of Solids, N. Y., 1964.
13. Колесников А. Е. Ультразвуковые измерения. Изд. стандартов, М., 1982.

ՊՅՆՁՈՒԿԻՍԱԶՍԱԿՈՐԴԻՉՆԵՐՈՒՄ ՈՒՆՏՐԱՉՍՅՆԻ ԼՈՒՍԱԶԳԱՅՈՒԷՄՍԱՐՈՒՄԸ ՉԱՓՆԵԼՈՒ ՄԵԹՈԴԻ ՎԵՐԱԲԵՐՑԱԿ

Ռ. Պ. ՎԱՐԴԱՊԵՏՅԱՆ

Աշխատանքում ուսումնասիրված է լույսի ազդեցությունը ֆոտոհաղորդիչ բյուրեղներում ուլտրաձայնի տարածման վրա: Ցույց է տրված, որ լույսի մեծ ինտենսիվությունների դեպքում ուլտրաձայնի արագության նվազման հետևանքով նվազում է բյուրեղի միջով ուլտրաձայնի մարսիմալ անցմանը համապատասխանող ռեզոնանսային հաճախությունը: Դա բերում է այն եզրակացության, որ շափումների ժամանակ անհրաժեշտ է հաշվի առնել հետևյալ հանգամանքները: 1. Հաստատուն հաճախությամբ շափում կատարելիս լուսազդայուն կլանման գործակիցի մեջ անհրաժեշտ է կատարել ճշգրտում, որը կապված է ռեզոնանսային հաճախության նվազման հետ: 2. Բյուրեղը լուսավորելիս ուլտրաձայնի հաճախությունից կախված կարելի է դիտել նրա ուժեղացում կամ նվազում:

ON THE MEASUREMENT OF LIGHT-SENSITIVE ATTENUATION OF ULTRASOUND IN PIEZOSEMICONDUCTORS

R. P. VARDAPETYAN

The effect of light on the ultrasound attenuation in photoconducting CdS crystals is studied. It is shown that the reduction in the velocity of ultrasound at the illumination leads to a decrease in the resonance frequency corresponding to maximum ultrasound transmission through the crystal. Hence, the following facts should be taken into account during the measurements: i) for measurements at fixed frequency of the ultrasound it is necessary to apply a correction for the resonance frequency drift; ii) at the illumination of the crystal one can observe both the effects of attenuation increase and decrease depending on the ultrasound frequency change.