

- [3] Lee Ping. Appl. Optics, 1983, v. 22, p. 1241—1246.  
 [4] Afanasev A. M., Kovalchuk M. V., Kovev E. K., Kohn V. G. Phys. St. Solidi(a), 1977, v. 42, N 1, p. 415—422.  
 [5] Пинскер Э. Г. Рентгеновская кристаллооптика. М.: Наука, 1982.

Институт прикладной физики  
 АН СССР  
 Горький

Поступило в Редакцию  
 5 февраля 1987 г.

УДК 621.315.592

Журнал технической физики, т. 58, в. 5, 1988

## УПРУГИЕ, ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУЛЬФИДА КАДМИЯ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

И. Б. Кобяков, В. М. Арутюнова

Сульфид кадмия — полупроводниковый пьезоэлектрик группы  $A^{II}B^{VI}$  — характерен удачным сочетанием целого ряда свойств. Он обладает кристаллической структурой вюрцита, которая описывается пространственной группой  $C_{6v}^4$  и точечной группой  $C_{6v}$ . Этот материал обладает большим значением коэффициентов электромеханической связи, темного удельного сопротивления и подвижности электронов, высокой фоточувствительностью, хорошими прочностными механическими и электрическими свойствами, что обусловило его широкое применение в различного типа электромеханических преобразователях. Экспериментальные данные по определению упругих, пьезоэлектрических и диэлектрических постоянных сульфид кадмия приведены во многих работах. В [1, 2] определены все упругие жесткости импульсным ультразвуковым методом с погрешностью, не превышающей 0.2 %. В [3] измерены упругие податливости  $s_{ij}$ , а в [4] — значения пьезомодулей  $d_{ij}$  и их знаки. В [5] методом резонанса—антирезонанса определен полный набор упругих, пьезоэлектрических и диэлектрических постоянных монокристаллов сульфид кадмия, полученных из газовой фазы. В [6] также определен полный набор постоянных на кристаллах, выращенных из расплава. В [7] приведены температурные зависимости упругих жесткостей  $c_{ij}$  в интервале температур 4.2—300 К, а в [8] — температурные зависимости упругих податливостей  $s_{11}^E$  и  $s_{12}^E$ , диэлектрических проницаемостей  $\epsilon_{33}^T$  и  $\epsilon_{11}^T$  и пьезомодуля  $d_{31}$  в интервале температур 1.5—300 К. Результаты, полученные в перечисленных работах, не всегда согласуются между собой. Это можно объяснить как несовершенством методик измерения, так и низким качеством исследованных кристаллов. Последнее обстоятельство особенно сильно влияет на величину добротности, а также на пьезоэлектрические постоянные и соответствующие им коэффициенты электро-механической связи.

В данной работе приведен полный набор упругих, пьезоэлектрических и диэлектрических постоянных CdS при комнатной температуре с целью оценки перспективности использования этого материала в различных типах пьезоэлектрических преобразователей. Исследованные нами монокристаллы были получены из газовой фазы. Выращивание производилось в интервале температур 1170—1200 °С в контейнере из кварцевого стекла особой чистоты на затравку, ориентированную в плоскости (0001). Скорости роста составляли 0.4—0.6 мм/ч. Выращенные монокристаллы имели форму буль диаметром до 50 мм и высотой до 40 мм. Они были светло-желтого или желтого цвета. Плотность дислокаций составляла  $\approx 10^2$  см<sup>-2</sup>. Образцы имели темновое удельное сопротивление  $\rho_T \approx 10^9$  Ом·см. Для улучшения стехиометрии и однородности образцы подвергались высокотемпературному отжигу в парах серы, после чего их темновое удельное сопротивление повышалось до  $10^{11}$  Ом·см. Плотность монокристаллов, определенная методом гидростатического взвешивания, оказалась равной  $4824.0 \pm 0.2$  кг/м<sup>3</sup>.

Симметрия сульфид кадмия определяет наличие у него пяти независимых упругих постоянных:  $s_{11}=s_{22}$ ,  $s_{33}$ ,  $s_{12}$ ,  $s_{13}=s_{23}$ ,  $s_{44}=s_{55}$ ; трех пьезоэлектрических постоянных:  $d_{31}=d_{32}$ ,  $d_{15}=d_{24}$ ,  $d_{33}$ ; двух диэлектрических проницаемостей:  $\epsilon_{11}=\epsilon_{22}$ ,  $\epsilon_{33}$ . Возбуждаемые моды колебаний для определения соответствующих постоянных, измеряемые величины и пересчетные формулы аналогичны описанным в [9]. Измерения проводились в темноте при комнатной температуре.

Электромеханические характеристики CdS

Постоянные	Численные значения	Отн. погрешность, %	Постоянные	Численные значения	Отн. погрешность, %
$s_{11}^E$	1.932	0.3	$c_{11}^E$	9.430	—
$s_{33}^E$	1.562	1	$c_{33}^E$	9.785	1.6
$s_{12}^E$	-0.938	1.2	$c_{12}^E$	5.946	—
$s_{13}^E$	-0.518	—	$c_{13}^E$	5.100	—
$s_{55}^E$	6.711	3	$c_{55}^E$	1.492	3
$s_{66}^E$	5.74	—	$c_{66}^E$	1.742	—
$d_{11}^D$	1.911	0.3	$c_{11}^D$	9.571	—
$d_{33}^D$	1.518	0.9	$c_{33}^D$	9.810	1.6
$d_{12}^D$	-0.960	1.2	$c_{12}^D$	6.088	—
$d_{13}^D$	-0.487	—	$c_{13}^D$	5.023	—
$d_{55}^D$	6.667	3.5	$c_{55}^D$	1.502	3.5
$d_{31}$	-4.36	0.2	$e_{31}$	-0.36	—
$d_{33}$	6.49	1	$e_{33}$	0.16	4.4
$d_{15}$	-7.55	—	$e_{15}$	-0.12	—
$k_{31}$	0.105	1.7	$\varepsilon_{11}^T$	8.94	4.6
$k_{33}$	0.171	1.3	$\varepsilon_{33}^T$	9.96	2.8
$k_{15}$	0.103	—	$\varepsilon_{11}^S$	8.88	4.2
$k_t$	0.055	4.1	$\varepsilon_{33}^S$	9.93	2.9

Примечание.  $s_{ij}$  — в  $10^{-11}$  м<sup>2</sup>/Н,  $c_{ij}$  — в  $10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>,  $d_{ij}$  — в  $10^{-12}$  Кл/Н,  $e_{ij}$  — в Кл/м<sup>2</sup>.

Для измерений были изготовлены 4 типа образцов: квадратные пластины Z-среза; бруски Z-среза с длиной, произвольно ориентированной в плоскости XY; квадратные пластины X- или Y-среза; бруски с длиной вдоль оси Z, параллельной вектору приложенного электрического поля. Плоскопараллельность пластин была лучше 1 мкм, точность ориентировки граней не превышала 15', на все образцы были нанесены серебряные электроды методом вакуумного напыления.

Полный набор упругих, пьезоэлектрических и диэлектрических постоянных сульфида кадмия при комнатной температуре представлен в таблице. Относительная погрешность характеризует разброс параметров материала в целом.

Кроме того, мы определили температурную зависимость сопротивления изоляции образцов сульфида кадмия в интервале температур 20—350 °С. Нагревание образцов проводилось в муфельной печи СНОЛ-1.6, сопротивление изоляции измерялось с помощью термометра Е6-13. Измерения показали, что при температуре в 150 °С сопротивление изоляции образцов со средними размерами  $10 \times 10 \times 1$  мм снижалось до  $10^7$  Ом. Поскольку при таком сопротивлении пьезоэлектрические преобразователи работают еще достаточно эффективно, температура 150 °С была принята нами за верхний предел рабочих температур.

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы.

1. Пьезоэлектрическая активность исследованных кристаллов оказалась значительно ниже в сравнении с данными, полученными другими авторами (так, у нас максимальные величины:  $k_{33}=17\%$ ,  $d_{15}=-7.6 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н; в работе [5]  $d_{15}=-14.0 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н). Это свидетельствует о большей дефектности отечественных кристаллов, как и больший разброс данных по упругости (в нашем случае 1—3 %).

2. Скорости звука имеют сравнительно высокие численные значения:  $v(s_{11})=3275$  м/с,  $v(s_{33})=3694$  м/с,  $v(c_{33})=4510$  м/с,  $v(c_{55})=1765$  м/с.

3. Сульфид кадмия может быть рекомендован для использования в различных типах пьезоэлектрических преобразователей: в излучателях и приемниках ультразвука, в виброакселерометрах, в дефектоскопах, в фильтрах с широкой полосой пропускания и т. д.

- [1] *Bolef D. J., Melamed N. T., Menes M. J.* Phys. Chem. Solids, 1960, v. 17, N 1/2, p. 143—148.  
 [2] *McScimin H. J., Bateman T. B.* J. Ac. Soc. Am., 1961, v. 38, N 6, p. 856—857.  
 [3] *Gutsche E.* Phys. Stat. Sol., 1961, v. 1, N 1, p. 30—36.  
 [4] *Hutson A. R.* Phys. Rev. Lett., 1960, v. 4, N 10, p. 505—507.  
 [5] *Berlincourt D., Jaffe H., Shiozawa L. R.* Phys. Rev., 1963, v. 129, N 3, p. 1009—1017.  
 [6] *Белые Л. М., Гильварг А. Б., Панова В. П.* и др. В сб.: Некоторые вопросы взаимодействия ультразвуковых волн с электронами проводимости в кристаллах. М., 1965, с. 33—46.  
 [7] *Gerlich D. J.* Phys. Chem. Solids, 1967, v. 28, p. 2575—2579.  
 [8] *Падо Г. С., Кобяков И. Б., Сысов Л. А.* ФТТ, 1969, т. 11, № 2, с. 478—480.  
 [9] *Токарев Е. Ф., Кобяков И. Б., Кузьмина И. П.* и др. ФТТ, 1975, т. 17, № 4, с. 980—986.

Поступило в Редакцию  
5 февраля 1987 г.

В окончательной редакции  
18 мая 1987 г.

Журнал технической физики, т. 58, в. 5, 1988

## ОБРАЗОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР ЗА ПЯТНОМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ДЕЙСТВУЮЩЕГО НА ПОВЕРХНОСТЬ КОНДЕНСИРОВАННОЙ СРЕДЫ

П. С. Кондратенко, Ю. Н. Орлов

При воздействии лазерного излучения на поверхность конденсированной среды существенную роль может играть процесс преобразования падающего излучения в поверхностные электромагнитные волны (ПЭВ), что приводит к пространственной модуляции энерговыделения на поверхности и, как следствие, образованию периодических структур (ПС) [1]. Во всех нам известных теоретических работах рассматривается процесс образования ПС в области, облучаемой лазерным пучком, однако поверхностные волны могут распространяться и за пределы лазерного пятна, что может привести к образованию ПС и в этой области. Например, для CO<sub>2</sub> лазера на поверхности металла длина пробега ПЭВ  $d \sim 1 \div 3$  см, а для Nd лазера  $d \sim 0.1 \div 0.5$  мм. Ниже мы теоретически предсказываем образование модулированного нагрева и ПС за пятном.

Для простоты изложения предположим, что лазерное пятно имеет резкую границу. Задачу образования ПС и возбуждения ПЭВ на пятне будем считать уже решенной, а напряженность электрического поля ПЭВ на границе пятна — известной функцией

$$E(\mathbf{r}, t) = \tilde{E}_{P_0}(\mathbf{r}, t) e^{iP_0 \tau}$$

(здесь и далее волна над функцией означает медленную по сравнению с  $2\pi/|P_0|$  составляющую;  $|P_0| \approx |k_0|$ ;  $k_0$  — волновой вектор падающего излучения возбуждающего ПЭВ;  $\mathbf{r}$  — двумерный вектор, параллельный невозмущенной поверхности среды). Распространение ПЭВ за пятном происходит по закону [2]

$$\tilde{E}_{P_0}^0(\mathbf{r}, t) = \tilde{E}_{P_0}(\gamma(\mathbf{r}), t) e^{-(1+i)|\gamma(\mathbf{r})-\mathbf{r}|/d}, \quad (1)$$

$d = 1/|\zeta'| |\zeta''| k_0$ ;  $\zeta = \zeta' + i\zeta''$  — поверхностный импеданс;  $|\zeta| \ll 1$ ;  $\gamma(\mathbf{r})$  — точка на границе пятна такая, что вектор  $\gamma(\mathbf{r}) - \mathbf{r}$  параллелен направлению распространения плазмона  $P_0$ .

Однако поле ПЭВ, возбужденной на пятне и распространившейся за его границу (1), еще не создает профилированного нагрева поверхности и не может образовать ПС. Такой нагрев получается при перерасеянии ПЭВ (1) на  $g$ -той компоненте Фурье функции профиля поверхности  $Z_g$ . Уравнения, описывающие процесс перерасеяния, интерференции ПЭВ и образования ПС совпадают с полученными в работе [3], если в них положить падающее излучение нулем