

энергий начального и конечного состояний системы от 0.3 до 3 эВ величина константы практически не меняется и на порядки превышает значения, вычисленные с помощью соотношений, полученных в [8]. Оценка суммарной константы скорости перезарядки на основании модели поляризационного захвата дает значение существенно большее, чем результаты измерений (табл. 1).

Авторы признательны Н. П. Пенкину за постоянное внимание к работе и полезное обсуждение материалов данной статьи.

Литература

- [1] С. Э. Фриш. Сб.: Спектроскопия газоразрядной плазмы, 7. Наука, Л., 1970.
- [2] R. Deloche, P. Mouchicourt, M. Cheret, F. Lambert. Phys. Rev., *A13*, 1140, 1976.
- [3] A. V. Phelps. Phys. Rev., *99*, 1307, 1955.
- [4] В. П. Жданов, М. И. Чибисов. Опт. и спектр., *41*, 521, 1976.
- [5] В. Н. Кодратьев, Е. Е. Никитин, А. И. Резников, С. Я. Уманский. Термические бимолекулярные реакции в газах. Наука, М., 1976.
- [6] С. Е. Johnson, С. А. Tipton, Н. G. Robinson. J. Phys., B: Atom. Molec. Phys., *11*, 972, 1978.
- [7] R. S. Bergman, L. M. Chanin. Phys. Rev., *A8*, 1076, 1973.
- [8] A. R. Turner-Smith, J. M. Green, С. E. Webb. J. Phys., B: Atom. Molec. Phys., *6*, 114, 1973.

Поступило в Редакцию 12 ноября 1981 г.

УДК 535.34.092 : 548.0

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПЬЕЗООТРАЖЕНИЯ ПОГЛОЩАЮЩИХ КРИСТАЛЛОВ НА ПРИМЕРЕ ПИРИТА

А. Х. Зильберштейн

Исследование влияния давления на оптические свойства монокристаллов представляет интерес, так как дает возможность определить ряд кристаллооптических параметров, знание которых позволяет найти величину приложенного к кристаллу давления. Явление пьезоотражения в поглощающих кристаллах кубической и гексагональной (кроме классов 6, $\bar{6}$, 6/m) сингоний при направлении одноосного давления X вдоль $[100]$ ($X = X_{11}$) для нормального отражения от грани $\{001\}$ кристалла может быть описано следующим образом [1]

$$\Delta R_{\parallel} = \sqrt{2} X_{11} |\bar{a}_{11}|^{-1} (1 + |\bar{a}_{11}| + \sqrt{2} \sqrt{|\bar{a}_{11}| + a_{11}})^{-2} \{ (a_{11} - 1) \sqrt{|\bar{a}_{11}| + a_{11}} - \bar{a}_{11} \sqrt{|\bar{a}_{11}| - a_{11}} \} \pi_{1111} + \{ (a_{11} - 1) \sqrt{|\bar{a}_{11}| - \bar{a}_{11}} + \bar{a}_{11} \sqrt{|\bar{a}_{11}| + a_{11}} \} \bar{\pi}_{1111}. \quad (1)$$

\bar{a}_{11} — поляризационная константа невозмущенного давлением кристалла $\text{Im} \bar{a}_{11} \equiv a_{11}^i$, $\text{Re} \bar{a}_{11} \equiv a_{11}$; ΔR_{\parallel} — изменение отражательной способности R грани $\{001\}$ кристалла под действием давления X_{11} в поляризации, параллельной направлению давления; π_{ijkl} — элемент комплексного пьезооптического тензора $\bar{\pi}_{ijkl} \equiv \pi_{ijkl} + i\bar{\pi}_{ijkl}$. Для определенности будем рассматривать пьезоотражение в монохроматическом свете (длина волны λ).

Общее выражение (1) неудобно при анализе экспериментальных данных, так как предполагает априорное знание матрицы поляризационных констант. Из определения комплексной амплитуды отраженного света легко получить выражение, связывающее экспериментально измеряемую отражательную способность кристалла R с соответствующими поляризационными константами

$$1 - R = 2\sqrt{2} \sqrt{a_{11}} \sqrt{(1 + k^2)^{1/2} + 1} / (1 + a_{11} (1 + k^2)^{1/2} + \sqrt{2} \sqrt{a_{11}} \sqrt{(1 + k^2)^{1/2} + 1}), \quad (2)$$

где $k \equiv a_{11}^i/a_{11}$. Подставив в формулу (1) величину \bar{a}_{11} , выраженную с помощью (2) через (R, k) , можно найти зависимость $\Delta R_{\parallel}(R, X, \pi_{ijkl}, k)$ для любого кристалла. Известны аналогичные зависимости для диэлектриков и проводников [1]. Однако в общем случае эти известные данные непригодны, так как

получены в пренебрежении либо мнимой (диэлектрики), либо вещественной (проводники) частью \bar{a}_{ij} .

Найдем такую зависимость для полупроводников, когда необходимо учитывать как $\text{Re } \bar{a}_{ij}$, так и $\text{Im } \bar{a}_{ij}$. Для типичных полупроводников в области фундаментального междузонного поглощения (не вблизи пиков «прямого» экситонного поглощения) можно полагать $k^2 \approx 0.1$ [2]. Тогда, при достаточно большой отражательной способности R , которая, например, для пирита в красной области оптического диапазона составляет ~ 0.525 [3], выражение (2) для таких кристаллов (с относительной погрешностью $\sim 10^{-2}$) имеет вид

$$a_{11} = \left(\frac{1 - \sqrt{R}}{1 + \sqrt{R}} \right)^2 \frac{\epsilon_1}{\sqrt{1 + k^2}}. \quad (3)$$

Положим, что соотношение между мнимой и вещественной частями добавок $\Delta \bar{a}_{ij}$ к поляризационным константам \bar{a}_{ij} (возникающих посредством явления пьезоотражения под влиянием одноосного давления X_{kl}) совпадает с таким соотношением для самих поляризационных констант

$$k \equiv \text{Im } \bar{a}_{ij} / \text{Re } \bar{a}_{ij} = \text{Im } \Delta \bar{a}_{ij} / \text{Re } \Delta \bar{a}_{ij} (\equiv \tilde{\pi}_{ijkl} X_{kl} / \pi_{ijkl} X_{kl}) = \tilde{\pi}_{ijkl}. \quad (2')$$

Такое предположение представляется более правильным и общим, чем известные допущения $\text{Re } \tilde{\pi}_{ijkl} = 0$ [4, 5], $\text{Re } \tilde{\pi}_{ijkl} = \text{Im } \tilde{\pi}_{ijkl}$ [6].

Подставив выражение (3) в формулу (1) с учетом (2'), получим окончательное однозначное соотношение для изменения отражательной способности полупроводникового кристалла в области фундаментального междузонного поглощения

$$\Delta R_{11} = \sqrt{2} X_{11} \pi_{1111} (\sqrt{\beta})^{-1/2} \gamma^{-1} \left(1 + \gamma^2 + \left(2 \frac{1 + \sqrt{\beta}}{\sqrt{\beta}} \right)^{1/2} \gamma \right)^{-2} \times \\ \times [\gamma^2 \sqrt{\beta} (\sqrt{\beta} + 1)^{1/2} - [(1 + \sqrt{\beta})^{1/2} + k (\sqrt{\beta} - 1)^{1/2}]], \quad (4)$$

где $\beta = 1 + k^2$, $\gamma = (1 - \sqrt{R}) / (1 + \sqrt{R})$. Для значения $k^2 = 0.1$, соответствующего типичному полупроводнику, выражение (4) имеет вид

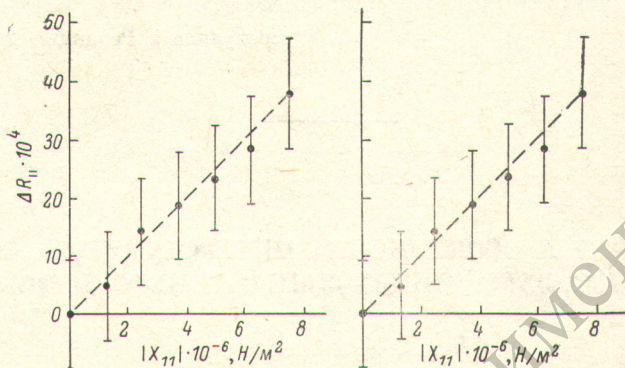
$$\Delta R_{11} \approx 1.07 X_{11} \pi_{1111} (1 + \sqrt{R})^3 \sqrt{R} / 2 (\sqrt{R} - 1). \quad (5)$$

Отметим, что выражение (5) с точностью до множителя 1.07 совпадает с видом зависимости $\Delta R_{11}(X_{11})$ для диэлектрика [1].

Было проведено экспериментальное исследование пьезоотражения полупроводникового кристалла FeS_2 симметрии $m\bar{3}$ (пирит). В нашем распоряжении находились оптически изотропные кристаллы Китильского полиметаллического месторождения (Приладожье). Кристаллы подвергались одноосному сжатию X_{11} вдоль [100]. Измерялась отражательная способность грани {010} для линейно поляризованного падающего монохроматического ($\lambda = 632.8$ нм) света, плоскость поляризации которого была параллельна направлению давления. Интенсивность отраженного света (R_{11}) регистрировалась фотоэлектрически. Было обнаружено изменение R_{11} при изменении величины X_{11} . На рисунке представлена «линейная» зависимость изменения отражательной способности ΔR_{11} от значения нагрузки X_{11} , что соответствует пьезоотражению (1), (4), (5). Такой вид зависимости $\Delta R_{11}(X_{11})$ наблюдается лишь при $X_{11} \leq X_{11}^0 \approx (1.5 \div 2) \cdot 10^7$ Н/м², т. е. X_{11}^0 — предел упругости пирита, что не противоречит известным данным [7]. Полученная зависимость $\Delta R_{11}(X_{11})$ (рисунок) и формула (5) дают возможность определить значение пьезооптического коэффициента пирита, которое составляет $\pi_{1111} = (6.8 \pm 0.7) \cdot 10^{-11}$ м²/Н.

Кроме того, был исследован природный оптически анизотропный кристалл пирита одного из рудопроявлений Енисейского кряжа. Как показано в работах [8-11], анизотропия отражения граней {100} пирита может быть вызвана рядом причин: отклонением реальной симметрии решетки от кубической, примесями (главным образом — As), присутствием преимущественно ориентированных анизотропных фаз (например, ромбической модификации FeS_2), комбинационной штриховкой граней, деформацией кристалла.

Выясним причину оптической анизотропии кристалла в данном случае. Рентгеновская дифракционная картина (полученная на установке ДРОН-2) от грани {100} кристалла соответствует кубической сингонии Ра3 с параметром ячейки (5.424 ± 0.001) Å. Рефлексы типа $i00$ (i — нечетное), наблюдаемые для пиритов пониженной симметрии решетки [8], и примесные фазы не обнаружены. Рентгеноспектральное микронное изучение анизотропных граней кристалла, выполненное на электронных микроскопах — анализаторах MBX и MS-46 («Самеса»), показало, что с точностью до погрешности эксперимента ($\pm 2\%$) кристалл стехиометричен, концентрация элементов-примесей ниже предела обнаружения ($\sim 0.05\%$). Исследование нормального отражения граней {100} и {010} кристалла в монохроматическом (632.8 нм) свете показало, что грани обладают двуотражением, причем поляризация, соответствующая большему отражению (R_{\max}), перпендикулярна [001] для обеих граней. Такая ориентировка азимутов двуотражения не соответствует анизотропии, возникающей за счет комбинационной штриховки [11].



Зависимость изменения отражательной способности ($\Delta R_{||}$) грани {010} пирита для монохроматического (632.8 нм) света, поляризованного параллельно направлению [100], вдоль которого приложено одноосное давление X_{11} , от величины $|X_{11}|$.

Итак, данное двуотражение возникает благодаря деформации, что соответствует геологическим данным, согласно которым кристалл испытал одноосное давление. Тогда анизотропию отражения граней {100} и {010} (P_1 и P_2 соответственно) можно представить в виде (5)

$$P_{1(2)} \equiv [(R_{\max} - R_{\min}) / (R_{\max} + R_{\min})]_{1(2)} \doteq \doteq 1.07 X_{11} [\pi_{1111} - \pi_{2211(1122)}] \left(\frac{\sqrt{R} (1 + \sqrt{R})^3}{4R (\sqrt{R} - 1)} \right)_{1(2)} \quad (6)$$

(R_{\min} — наименьшее значение отражения грани, соответствующее направлению поляризации падающего света параллельно [001]). Измеренные значения P_1 и P_2 составили $(1 \pm 1) \cdot 10^{-2}$ и $(2 \pm 1) \cdot 10^{-2}$, откуда по (6) можно найти соотношения для элементов пьезооптического тензора пирита $\left| \frac{\pi_{1111} - \pi_{2211}}{\pi_{1111} - \pi_{1122}} \right| = |0.50 \pm 0.75|$ и (используя полученное значение π_{1111}) $\left| \frac{\pi_{2211} - \pi_{1122}}{\pi_{1111}} \right| = |3.4 \pm 5.1| \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{Н}$. Полагая $|\pi_{1111} - \pi_{2211(1122)}| \approx |\pi_{1111}|$, по формуле (6) легко оценить величину механического напряжения исследуемого природного кристалла пирита, которая составила $|X_{11}| \doteq (42 \pm 21) \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$.

Таким образом, впервые получены выражения (4), (5) однозначно описывающие пьезоотражение в поглощающих кристаллах (полупроводниках), для которых необходимо учитывать вклад как от $\text{Im}(\bar{a}_{ij}, \Delta \bar{a}_{ij})$, так и от $\text{Re}(\bar{a}_{ij}, \Delta \bar{a}_{ij})$. По экспериментальной зависимости $\Delta R_{||}(X_{11})$ в рамках описанной теории явления пьезоотражения с помощью формулы (5) определены значения элементов пьезооптического тензора полупроводникового кристалла на примере пирита (при $\lambda = 632.8 \text{ нм}$). Эти значения позволили по пьезоотражению, индуцированному остаточными напряжениями в природном кристалле пирита, оценить величину таких напряжений.

Автор выражает благодарность А. М. Ларину и А. Я. Пшеничкину за предоставление кристаллов и К. С. Мищенко и А. А. Кузьмину за проведение рентгеновских исследований.

Литература

- [1] А. Х. Зильберштейн. Зап. Всес. Минер. О-ва, *109*, 112, 1980.
- [2] Физика и Химия соединений $A^{IV}B^{VI}$, ред. С. А. Медведев. Мир, М., 1970.
- [3] А. Н. Винчелл, Г. Винчелл. Оптическая минералогия. ИЛ, М., 1953.
- [4] G. W. Gobeli, E. O. Kane. Phys. Rev. Lett., *15*, 142, 1965.
- [5] B. O. Segarphin. In: Optical properties of solids, North-Holland Publish Company, Amsterdam-London, 1962, p. 163.
- [6] А. Х. Зильберштейн, Г. И. Шафрановский. ДАН СССР, *246*, 1457, 1979.
- [7] Справочник физических констант горных пород, ред. С. Кларк, Мир, М., 1969.
- [8] P. Bayliss. Amer. mineral., *62*, 1162, 1977.
- [9] D. D. Klemm. Neues Jahrb. Miner. Abh., *97*, 337, 1962.
- [10] M. E. Fleet. Zeit Kristall., *142*, 332, 1975.
- [11] G. S. Gibbous. Amer. mineral., *52*, 359, 1967.

Поступило в Редакцию 2 декабря 1981 г.

УДК 535.41

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА В ЛУЧАХ, РАССЕЯННЫХ ЗАПЫЛЕННЫМ ЗЕРКАЛОМ

Я. Э. Амтиславский

Случай интерференции в лучах, рассеянных запыленным зеркалом, характеризуется рядом любопытных особенностей [1, 2]. Одна из них заключается в том, что независимо от расположения зеркала относительно освещающего источника S интерференционная картина всегда возникает на фоне зеркального изображения S' этого источника. В силу компенсационного эффекта при любой толщине зеркала картина, формируемая им, представляет собой систему полос самых первых порядков и может быть получена в белом свете, причем ахроматическая нулевая полоса системы проходит через изображение S' . Эти и некоторые другие «геометрические» особенности расположения затрагиваются ниже при рассмотрении свойств составного тонкого воздушного зеркала. Однако основной интерес представляет вопрос о влиянии свойств рассеивающего покрытия — его структуры и плотности — на распределение освещенности в интерференционной картине и на контрастность полос. Вопрос такого рода и являлся предметом изучения в описываемых ниже опытах.

Использованный в опытах прибор представлял собой сочетание плоского зеркала с внешним металлическим покрытием и пластинки оптического стекла, запыленной с внутренней стороны. Запыленная поверхность отделялась от зеркальной посредством тонкой прокладки, толщина которой в ходе опытов варьировалась от 0.1 до 0.02 мм. Скрепленная оправой эта система представляет собой своеобразный интерферометр в виде тонкого запыленного воздушного зеркала.

Для выяснения природы явления и геометрии полос обратимся к рис. 1, а. Здесь I — плоская поверхность с нанесенным на ней рассеивающим покрытием, II — зеркальная поверхность, параллельная I и отделенная от нее воздушной прослойкой толщиной t . Пусть на поверхность I падает плоская световая волна (лазерный пучок) под углом α , а интерференционная картина наблюдается на удаленном экране или в фокальной плоскости вспомогательного объектива.

В результате частичного рассеяния на поверхности I , зеркального отражения от поверхности II и вторичного частичного рассеяния на поверхности I падающая волна делится на несколько частей и в рассеянных лучах формируются несколько перекрывающихся пучков. Два из них, характеризующиеся близкой