

07

©1994 г.

АНАЛИЗ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНОГО ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.М.Котов

Институт радиотехники и электроники, 141120, Фрязино, Московская область
(Поступило в Редакцию 6 сентября 1993 г.)

Проведен теоретический анализ частотных, угловых и амплитудных характеристик 4-компонентного брэгговского поляризационного расщепления монохроматического излучения на основе векторных диаграмм и метода связанных волн. Показано, что метод векторных диаграмм с использованием вида индикатрис, полученных на основе решения дисперсионного уравнения, в целом достаточно хорошо описывает частотные характеристики дифракции, наблюдаемые в эксперименте, однако дает ошибку при описании его угловых характеристик. Исследованы причины расхождения теории и эксперимента.

В [1] экспериментально исследовано брэгговское поляризационное расщепление монохроматического излучения в монокристалле TeO_2 на четыре дифракционных компоненты (которые вместе с прошедшим излучением составляют пятикомпонентный брэгговский расщепитель), возникающие в результате акустооптической (АО) дифракции двух собственных оптических мод кристалла на двух взаимоортогональных акустических волнах. Однако в этой работе не дано теоретического объяснения 4-компонентного расщепления. Более того, в рамках широко используемых моделей, основанных на построении векторных диаграмм, являющихся наиболее простым и удобным способом описания АО дифракции (см., например, [2,3]), этот эффект не должен наблюдаться.

В настоящей работе рассматривается расщепление на основе векторных диаграмм, но при произвольной ориентации оптической грани кристалла TeO_2 и произвольных наклонах звуковых волн относительно кристаллографических осей $[110]$ и $[\bar{1}\bar{1}0]$, делается анализ применимости метода для описания расщепления. Кроме того, исследуются амплитудные характеристики 4-компонентной дифракции.

На рис. 1 показана оптическая схема 4-компонентного расщепления на базе монокристалла TeO_2 . Входное оптическое излучение с волновым вектором \mathbf{K}_i падает на входную грань кристалла, нормаль к которой \mathbf{N} составляет угол β_0 с оптической осью $[001]$ кристалла. Векторы

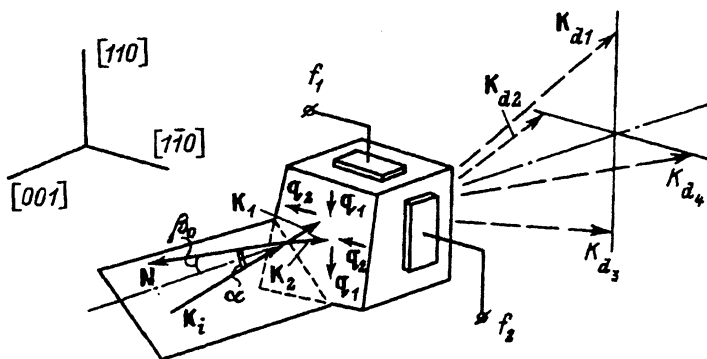


Рис. 1. Оптическая схема четырехкомпонентного расщепления.

K_i и N лежат в плоскости P . Угол между K_i и N равен α . Внутри кристалла K_i распадается на две собственных волны K_1 и K_2 , каждая из которых дифрагирует на акустических волнах q_1 и q_2 : K_1 дифрагирует в направления K_{d1} и K_{d2} , а K_2 — в направления K_{d3} и K_{d4} . Считаем, что все лучи находятся в брэгговском синхронизме друг с другом, т.е. в результате каждого акта дифракции возникает только один дифракционный порядок. q_1 и q_2 распространяются под некоторым углом к направлениям $[110]$ и $[1\bar{1}0]$. Векторная диаграмма и векторные уравнения, описывающие эту дифракцию, приведены в [1]. По сути здесь происходят одновременно два процесса поляризационного брэгговского расщепления (в ортогональных плоскостях), описанного в [4].

На рис. 2 показана ориентация акустических векторов q_1 и q_2 относительно осей $[110]$ и $[1\bar{1}0]$, P_1 и P_2 — плоскости, проходящие через оси кристалла $[00\bar{1}]$, $[110]$ и $[00\bar{1}]$, $[1\bar{1}0]$ соответственно. Расчеты показывают, что наибольшее влияние на условия брэгговского синхронизма происходит тогда, когда q_1 лежит в плоскости P_1 и варьируется угол

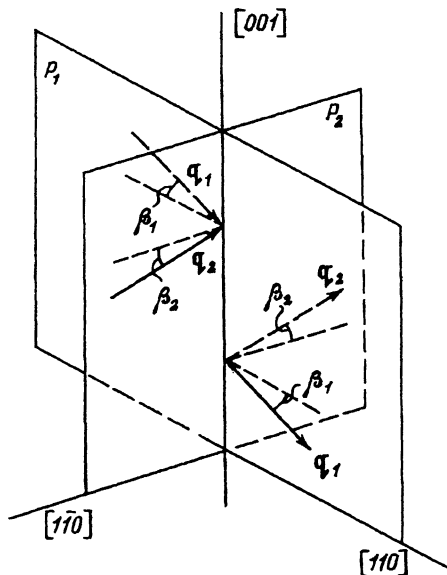


Рис. 2. Ориентация акустических векторов q_1 и q_2 относительно осей кристалла.

β_1 между \mathbf{q}_1 и осью [110] (аналогично, когда \mathbf{q}_2 лежит в P_2 и варьируется β_2 между \mathbf{q}_2 и [110]). В дальнейшем для упрощения анализа будем рассматривать изменение направлений \mathbf{q}_1 и \mathbf{q}_2 только в плоскостях P_1, P_2 соответственно, т.е. только изменение углов β_1 и β_2 . На рис. 2 показаны четыре акустических вектора: два \mathbf{q}_1 и два \mathbf{q}_2 , которые соответствуют четырем акустическим векторам на рис. 1.

Для количественного расчета параметров 4-компонентного расщепления воспользуемся обобщенным видом индикатрис, полученных на основании решения дисперсионного уравнения для одноосного гиротропного кристалла [5], которые точнее описывают АО дифракцию по сравнению с моделью, предложенной в [2],

$$\frac{n_z^2}{n_0^2} + \frac{n_x^2 + n_y^2}{2} \left(\frac{1}{n_0^2} + \frac{1}{n_e^2} \right) \pm \frac{1}{2} \sqrt{(n_x^2 + n_y^2)^2 \left(\frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n_e^2} \right)^2 + 4G_{33}^2 n_z^4} = 1, \quad (1)$$

где n_x, n_y, n_z — проекции показателя преломления собственной оптической моды на направления [110], [110] и [001] соответственно; n_0 и n_e — показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей, распространяющихся перпендикулярно оптической оси кристалла (в отсутствие гиротропии); G_{33} — компонента псевдотензора гирации.

Мы рассматриваем распространение оптического излучения вблизи оптической оси кристалла и распространение поперечных звуковых волн вблизи направлений [110] и [110], так как именно этот случай является наиболее привлекательным с практической точки зрения: при такой геометрии достигается наибольшая величина АО качества материала $M_2 = n_0^6 p^2 / \rho v^3$, где p — эффективный упругооптический коэффициент, ρ — плотность среды, v — скорость звуковой волны (p и v зависят от геометрии АО взаимодействия [3]: например, для TeO_2 при вышеуказанной ситуации $M_2 = 1200 \cdot 10^{-18} \text{ с}^3/\text{г}$).

Вычисления проделаны для трех длин волн оптического излучения: 488, 514 и 633 нм (линии излучения Аг и He-Ne лазеров). Изменение

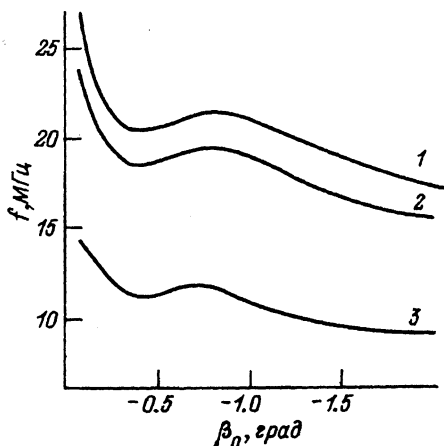


Рис. 3. Зависимость частоты звука f от угла β_0 .

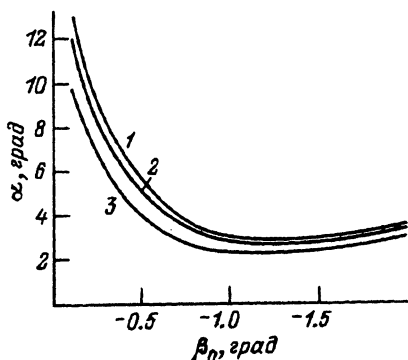


Рис. 4. Зависимость угла падения α излучения на кристалл от угла β_0 .

скорости звука при наклоне \mathbf{q}_1 и \mathbf{q}_2 к направлениям $[110]$ и $[1\bar{1}0]$ учитывалось согласно [6].

На рис. 3 в качестве примера показаны зависимости угла падения α излучения на кристалл от угла β_0 между \mathbf{N} и $[001]$. Расчеты сделаны для случая, когда векторы \mathbf{K}_i , \mathbf{N} и оптическая ось $[001]$ лежат в одной плоскости P (рис. 1). Кроме того, предполагается, что P содержит ось $[010]$ кристалла, т.е. ориентирована под углом 45° к направлениям $[110]$ и $[1\bar{1}0]$. Кривые 1–3 описывают зависимости для оптических лучей с длинами волн 488, 514 и 633 нм соответственно. Видно, что при $\beta_0 \rightarrow 0$ угол $\alpha \rightarrow \infty$, т.е., строго говоря, при ориентации входной грани, параллельной грани $\{001\}$ кристалла, 4-компонентное расщепление невозможно. Такой же результат получается и при использовании модели индикатрис [2]. При вычислении зависимостей на рис. 3 предполагалось, что углы $\beta_1 = \beta_2 = 0$ (т.е. акустические волны распространяются строго вдоль $[110]$ и $[1\bar{1}0]$).

На рис. 4 показаны зависимости частоты акустической волны f от угла β_0 в предположении, что $\beta_1 = \beta_2 = 0.4^\circ$ (при $\beta_1 = \beta_2 \rightarrow 0$ частота $f \rightarrow \infty$). Нумерация кривых соответствует нумерации рис. 3.

На рис. 5 показаны зависимости частоты звука f 4-компонентного расщепления от углов β_1 и β_2 (в предположении $\beta_1 = \beta_2$) для случая, когда $\beta_0 = -1.5^\circ$. Из рисунка видно, что частота меняется на 30% при изменении β_1, β_2 от 0.2 до 0.8° . Отметим, что для $\beta_1 = \beta_2 < 0.2^\circ$ дифракция не наблюдается.

На рис. 6 приведены результаты расчета максимальной интенсивности I дифрагированных лучей, вычисленные на основе метода связанных волн [3], от угла $\beta_1 = \beta_2$. Нумерация кривых на всех рисунках соответствует нумерации на рис. 3. При вычислениях, приведенных на рис. 6, предполагалось, что акустические волны \mathbf{q}_1 и \mathbf{q}_2 распространяются строго вдоль направлений $[110]$ и $[1\bar{1}0]$, но условия брэгговского

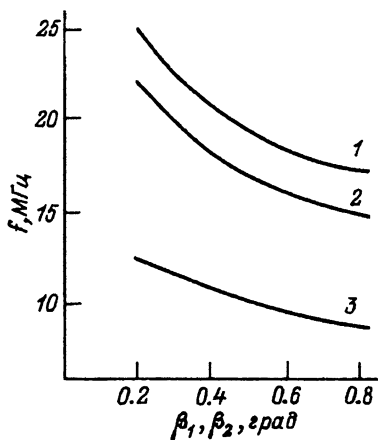


Рис. 5. Зависимость частоты звука f от угла β_1, β_2 при условии $\beta_1 = \beta_2$.

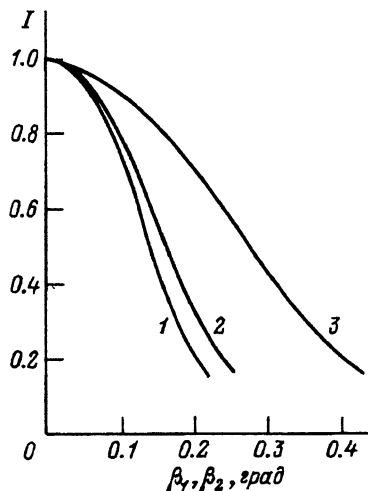


Рис. 6. Зависимость максимальной интенсивности дифракции I от β_1, β_2 (при $\beta_1 = \beta_2$).

синхронизма выполняются только для направлений звуковых волн, наклоненных к $[110]$ и $[\bar{1}\bar{1}0]$ на углы β_1 и β_2 . Вычисления сделаны для длины АО взаимодействия 0.5 см. Кривая 1 построена для длины волны света 488 нм и частоты звука $f = 20$ МГц, 2 — для $\lambda = 514$ нм и $f = 17$ МГц, 3 — для $\lambda = 633$ нм и $f = 10$ МГц. Выбор акустических частот (разный для разных длин волн) обусловлен частотными зависимостями рис. 5: выбранные частоты соответствуют средним частотам зависимостей 1–3 (рис. 5). Из рис. 6 видно, что для $\beta_1 = \beta_2 = 0.2^\circ$ (которые соответствуют минимальному углу 4-компонентной дифракции) (рис. 5) интенсивности АО дифракции равны 20, 35 и 70% для кривых 1–3 соответственно.

Сравнивая полученные теоретические результаты с экспериментальными [1] нужно отметить, что в [1] наблюдалось 4-компонентное расщепление даже в случае, когда входная оптическая грань совпала с гранью $\{001\}$ кристалла. При этом была достаточно высокая эффективность дифракции, до 85% от падающего излучения отклонялось в дифракционные порядки. По теоретическим расчетам такого быть не должно. Это расхождение может быть вызвано несколькими причинами. Во-первых, точность ориентировки рабочих граней кристалла в [1] была $5' - 10'$, что в принципе может обеспечить “нужные” наклоны согласно полученным теоретическим результатам. Во-вторых, метод с использованием векторных диаграмм недостаточно точно описывает АО взаимодействие для ситуации, когда свет распространяется вблизи оптической оси. Строго говоря, здесь нужно учитывать “возмущение” индикатрис акустической волной. Действительно, “возмущение” показателя преломления Δn упругой волной, распространяющейся вдоль $[110]$ монокристалла TeO_2 с акустической мощностью, например, $P_{\text{ак}} = 0.2$ Вт/см², равно [3] $\Delta n = \sqrt{M_2 P_{\text{ак}}} = 0.5 \cdot 10^{-4}$, что сравнимо с Δn за счет естественного двулучепреломления в одноосном гиротропном кристалле $\Delta n \approx n_0^3 G_{33} \approx 10^{-4}$. В-третьих, в расчетах не учитывается расходимость света и звука, что может также повлиять на характеристики процесса расщепления.

Из сопоставления теоретических расчетов и эксперимента [1] можно видеть, что расхождение наблюдается прежде всего в угловых характеристиках, тогда как поведение акустических частот в целом близко к друг другу (расхождение между ними 5–10%). Отметим, что аналогичные зависимости, полученные на основании модели [2], дают завышенные значения для частоты по сравнению с [1] на 30%.

В настоящей работе проведен достаточно полный теоретический анализ частотных, угловых и амплитудных характеристик 4-компонентного брэгговского расщепления оптического излучения на основе векторных диаграмм и метода связанных волн. Показано, что метод векторных диаграмм с использованием вида индикатрис, предложенный в [5], в целом достаточно хорошо описывает частотные характеристики процесса, давая значительную ошибку при описании его угловых характеристик. Для уточнения картины 4-компонентного расщепления необходимы дополнительные теоретические и экспериментальные исследования, в частности, для случаев, когда входная оптическая грань наклонена на угол β_0 к грани $\{001\}$ кристалла, а также более тщательные исследования зависимости расщепления от мощности звука.

Список литературы

- [1] *Котов В.М.* // Квантовая электроника. 1992. Т. 19. № 10. С. 1038–1040.
 - [2] *Warner A.W., White D.L., Bonner W.A.* // J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43. P. 4489–4495.
 - [3] *Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е.* Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 280 с.
 - [4] *Котов В.М.* // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. Вып. 9. С. 12–15.
 - [5] *Котов В.М.* // Опт. и спектр. 1993. Т. 74. Вып. 2. С. 386–391.
 - [6] *Карплюк К.С., Левченко Е.Г.* // Опт. и спектр. 1990. Т. 68. Вып. 6. С. 1340–1343.
-