

## СВЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ЛАЗЕРНОМ ПУЧКЕ

*А.А.Чабан*

Мощный лазерный пучек через механизм электрострикции приводит к сильной деформации кристалла. Вследствие этого появляется постоянное во времени электрическое поле. В пьезоэлектриках оно обусловле-

но пьезоэлектрическим эффектом и по величине может быть сравнимо с амплитудой электрического поля светового пучка. В этом случае можно ожидать пробойных явлений и разрушения кристалла. В непьезоэлектрическом кристалле в самофокусирующемся лазерном пучке [1] также появляется постоянное во времени электрическое поле из-за неоднородности деформации по сечению пучка [2]. Его напряженность может составлять  $\sim 10^3$  в.см<sup>-1</sup>.

Рассмотрим вначале пьезоэлектрический кристалл, равномерно освещенный линейно поляризованным лазерным пучком. Вследствие электрострикции появится деформация:

$$u_{ij} = \frac{1}{2} R_{ijkl} E_k E_l, \quad (1)$$

где  $E_i$  — амплитуда электрического поля световой волны,  $R_{ijkl}$  — тензор электрострикции. Пьезоэлектрические свойства приведут к поляризации кристалла:

$$P_m = e_{mij} u_{ij} = \frac{1}{2} e_{mij} R_{ijkl} E_k E_l, \quad (2)$$

где  $P_m$  — дипольный момент единицы объема,  $e_{mij}$  — пьезоэлектрический тензор. Если для грубой оценки рассмотреть бесконечный слой вещества с границами, нормальными к  $x$ -оси, то электрическое поле, обусловленное поляризацией:

$$E_x^0 = -4\pi P_x.$$

Полагая  $e_{ijk} \sim 10^5$  CGSE,  $R_{ijkl} \sim 10^{-12}$  CGSE, легко проследить, что

$$E_x^0 \sim 10^{-6} W, \quad (3)$$

где  $E_x^0$  выражено в единицах в.см<sup>-1</sup>, а  $W$  — плотность потока световой волны в единицах вт.см<sup>-2</sup>. Таким образом, при  $W \sim 10^8$  вт.см<sup>-2</sup> на слое шириной в 1 см будет зафиксирована разность потенциалов  $\sim 100$  в. (Учет конечности кристалла не изменит, разумеется, порядка величины.) Исследование наведенной светом разности потенциалов в пьезоэлектрических кристаллах позволит экспериментально выяснить вопрос о том, каковы в действительности деформации, создаваемые световым полем. Не исключено, что они могут отличаться от тех, которые получаются для статических значений величины  $R_{ijkl}$  (за обсуждение этого вопроса автор благодарен Г.А.Аскарьяну).

Особо большой величины напряженность постоянного электрического поля  $E^0$  может достигать при фокусировке лазерного пучка или при его самофокусировке в пьезоэлектрическом кристалле. В обоих этих случаях интенсивность света будет сильно изменяться по сечению, т.е. будет

сильно изменяться по сечению и постоянное электрическое поле, которое определяется условием:  $\operatorname{div} E^{\circ} = -4\pi \operatorname{div} P$ . В первом приближении имеем для абсолютных величин:  $E^{\circ} \sim 4\pi P$ . (Отметим, что в случае узкого самофокусированного пучка, распространяющегося вдоль оси  $z$ ,  $u_{zz} \approx 0$  из простых геометрических соображений. Однако для грубой оценки порядков величин эффекты этого типа не существенны.) Тогда постоянное во времени электрическое поле вновь можно оценивать по формуле (3), только оценка будет относиться уже к абсолютной величине  $E^{\circ}$ . При  $W = 10^{12} \text{ вт} \cdot \text{см}^{-2}$ , что соответствует амплитуде электрического поля в световом пучке  $E \approx 10^7 \text{ в} \cdot \text{см}^{-1}$ , постоянное поле  $E^{\circ} \sim 10^6 \text{ в} \cdot \text{см}^{-1}$ . Таким образом, в пьезоэлектрическом кристалле при большой мощности светового пучка можно ожидать электрического пробоя под действием  $E^{\circ}$  и вследствие этого разрушения кристалла. Нам кажется, что этот механизм ионизации будет в определенных условиях существеннее, чем многофотонная ионизация под действием света. В самом деле, если принять длину свободного пробега электрона в зоне проводимости  $\sim 10^{-5} \text{ см}$  (для "горячих" электронов она может быть, вообще говоря, значительно больше), то электрон между двумя столкновениями получает энергию  $\sim 10$  электрон-вольт, т.е. может возникнуть ударная ионизация. Под действием же переменного электрического поля световой волны электрон в зоне проводимости, как легко проследить, получит энергию  $e_0^2 E^2 / 2m\omega^2 \sim 10^{-1}$  электрон-вольт, где  $e_0$  — заряд электрона,  $m$  — его масса,  $\omega$  — частота света. Таким образом, ударная ионизация и возникновение электронной лавины возможны лишь под действием постоянного поля. Если ударная ионизация достигается, то постоянное поле играет, по-видимому, определяющую роль (конечно, электроны, появляющиеся при многофотонной ионизации могут быть существенны при возникновении электронной лавины).

Поскольку свободные электроны, появляющиеся при ионизации атомов, будут ослаблять поле  $E^{\circ}$ , то за время действия светового импульса разрушения кристалла даже при столь большой интенсивности пучка, на первый взгляд, может не наступить. Однако для эффективной компенсации  $E^{\circ}$  концентрация электронов должна составлять  $n \sim P / e_0 d$ , где  $d$  — диаметр пучка или фокального пятна. При  $d \sim 10^{-2} \text{ см}$ ,  $W \sim 10^{12} \text{ вт} \cdot \text{см}^{-2}$  получаем  $n \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . При таких концентрациях электронов проводимости, если их подвижность не слишком велика, свет может целиком поглотиться на расстоянии менее  $1 \text{ см}$  [3]. Тогда простые оценки показывают, что нагревание за время действия светового импульса составит тысячи градусов. Это приведет к разрушению кристалла в рассматриваемой области.

Нам известно две работы, где исследовалось прохождение лазерного пучка через пьезоэлектрики [4, 5]. В работе [4] роль постоянного электрического поля, исходя из приведенных выше оценок, должна быть весьма велика, и учет его, возможно, позволит понять некоторые интересные особенности вынужденного рассеяния, обнаруженные в [4]. (В [4]  $E \approx 2 \cdot 10^7 \text{ в} \cdot \text{см}^{-1}$  даже без учета самофокусировки; эта величина и использована в вышеприведенных оценках).

При фокусировке или самофокусировке световых пучков постоянное во времени электрическое поле будет появляться и в кристаллах с центром симметрии за счет неоднородности деформации по сечению пучка или фокального пятна. Согласно [2], дипольный момент единицы объема в пьезоэлектрическом кристалле при деформации, описываемой вектором смещения  $u_j$ , выражается в виде:

$$P_i = \gamma_{ijkl} \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_k \partial x_e} \quad (4)$$

При этом:

$$\gamma_{ijkl} \sim \frac{e_0}{a}, \quad (5)$$

где  $a$  — период решетки. Тогда постоянное во времени электрическое поле, обусловленное неоднородностью деформации под действием лазерного пучка, можно оценить по аналогии с предыдущим:

$$E^0 \sim 10^{-8} \frac{W}{k}, \quad (6)$$

где  $E^0$  записано в единицах  $\text{в} \cdot \text{см}^{-1}$ ,  $W$  в единицах  $\text{вт} \cdot \text{см}^{-2}$ ,  $k = d/\lambda$ ,  $\lambda$  — длина световой волны в веществе. Например, при  $W \sim 10^{12} \text{ вт} \cdot \text{см}^{-2}$ ,  $k \sim 10$ , имеем  $E^0 \sim 10^3 \text{ в} \cdot \text{см}^{-1}$ . Теперь ясно, что в очень узких самофокусированных пучках в пьезоэлектрическом кристалле напряженность постоянного во времени электрического поля может оказывать весьма существенное влияние на свойства среды.

Акустический институт  
Москва

Поступило в редакцию  
18 октября 1966 г.

### Литература

- [1] Г.А.Аскарьян, ЖЭТФ, 42, 1567, 1962. В.И.Таланов. Изв.вузов, сер.радиофизика, 7, 564, 1964. R.Y.Chiao, E.Garmire, C.H.Townes. Phys. Rev. Lett., 13, 479, 1964.
- [2] Ш.М.Коган. ФТТ, 5, 2829, 1963.
- [3] Т.Мосс, Оптические свойства полупроводников, М., 1961.
- [4] С.В.Кривохижа, Д.И.Маш, В.В.Морозов, В.С.Старунов, И.Л.Фабелинский. Письма ЖЭТФ, 3, 378, 1966.
- [5] М.С.Бродин, В.Н.Ватулев, С.В.Закревский. Письма ЖЭТФ, 2, 317, 1965.