

После того как это расстояние будет $R > \epsilon$, можно опять перейти к численному интегрированию исходной системы (1)—(3). Описанную процедуру можно повторить в случае любого другого двойного соударения между материальными точками (звездами) рассматриваемой механической системы. Возникает вопрос: как поступить, если происходит одновременно (но в разных местах) два двойных столкновения? Необходимо отметить, что вероятность появления одновременно двух двойных соударений в реальной звездной системе весьма мала. Однако вполне реальна такая ситуация, когда образовалась и продолжает существовать тесная пара (двойная звезда) и в процессе эволюции этой пары происходит соударение другой пары звезд. Если предположить, что рассматриваемые пары достаточно удалены друг от друга и от остальных звезд системы, то можно ввести, согласно [4], две временные переменные, выбирая в качестве независимой переменной наименьшую из них.

Описанный алгоритм регуляризации уравнений движения реализован на ЭВМ БЭСМ-4М и используется при исследовании динамической эволюции подсистемы ярких звезд скопления Меч Ориона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Дубошин Г. Н., Рыбаков А. И., Калинина Е. П., Холопов П. Н. О динамической эволюции трапеции Ориона. — Сообщения ГАИШ, 1971, 175, с. 35—38.
[2] Kustaanheimo P., Stiefel E. Perturbation theory of Kepler motion based on spinor regularization. — J. Reine Angew. Math., 1965, 218, p. 204—219. [3] Штифель Е., Шейфеле Г. Линейная и регулярная небесная механика. М., 1975, с. 27—39. [4] Gravitational N-body problem. Ed. M. Lecar. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1972, p. 402—403.

Поступила в редакцию
07.01.80

УДК 548.4:537.226

СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДОМЕНЫ И УДВОЕНИЕ ЧАСТОТЫ ОКГ В КРИСТАЛЛАХ $Ba_2NaNb_5O_{15}$

А. Л. Александровский

(кафедра физики кристаллов)

Сегнетоэлектрические домены в монокристаллах ниобата бария—натрия (стехиометрическая формула соединения $Ba_2NaNb_5O_{15}$) изучались методом химического травления [1] и методом Мерца [2]. Ниобат бария—натрия (НБН) — одноосный сегнетоэлектрик с центросимметричной параэлектрической фазой, поэтому он обладает только 180-градусными доменами, которые оптически неразличимы. Последнее справедливо лишь для линейных оптических свойств, квадратичная нелинейная восприимчивость меняет знак на границах доменов.

В работе [3] сообщалось о необычном типе генерации второй гармоники ОКГ в полидоменных кристаллах НБН. В настоящей работе приводятся результаты изучения генерации второй гармоники (ГВГ) для двух основных разновидностей доменной структуры кристаллов НБН: слоистой и состоящей из микродоменов. Приводятся также данные о ГВГ в сегнетоэлектрических кристаллах, родственных НБН: ниобате бария—лития и ниобате калия—лития. Для объяснения экспери-

ментальных данных применяется теория нелинейного рассеяния света на доменах [4, 5].

Эксперименты проводились на установке, аналогичной устройству, описанному в работе [5]. Источником излучения на длине волны 1,06 мкм служил ОКГ ЛТИ-5, работавший в одностороннем режиме с частотой повторения 12,5 Гц. Система регистрации интенсивности второй гармоники была идентична использованной в работе [6]. Доменная структура образцов НБН контролировалась методом Мерца и представлена на рис. 1. На рис. 2, а показано угловое распределение второй гармоники для кристалла с неупорядоченной доменной структурой, содержащей иглообразные микродомены. Луч ОКГ проходил сквозь образец перпендикулярно полярной оси Z , в направлении оси X . Направление колебаний электрического вектора световой волны совпадало с осью Z . Единственный нелинейный коэффициент, действующий при такой поляризации падающего луча — d_{33} . В согласии с этим излучение на длине волны 0,53 мкм имело поляризацию, совпадающую с поляризацией падающего луча. Как и в работе [3], наблюдалось размытое пятно второй гармоники, удлиненное в плоскости XY (угол рассеяния φ , как видно на рис. 2, а, достигал 15° в кристалле) и сжатое в направлении оси Z (угол рассеяния в этом направлении не превышал 2°).

Нелинейное рассеяние света подчиняется закону сохранения импульса [5]:

$$\mathbf{q} = -2\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2, \quad (1)$$

где \mathbf{q} — вектор, представляющий действие доменной структуры на луч, а \mathbf{k}_1 и \mathbf{k}_2 — волновые векторы основной волны и второй гармоники. В грубом приближении [4] возможные направления вектора \mathbf{q} перпендикулярны доменным стенкам, а его модуль обратно пропорционален размеру доменов L в данном направлении:

$$|\mathbf{q}| \approx \pi/L. \quad (2)$$

Углы рассеяния второй гармоники определяются в соответствии с условием (1) построением векторного треугольника с использованием поверхностей волновых векторов $2\mathbf{k}_1$, \mathbf{k}_2 (см. рис. 2, б). Пользуясь оценкой (2), экспериментальные данные можно объяснить рассеянием второй гармоники на микродоменах, поперечный размер которых заключен в интервале от 1 до 3 мкм, а размер в направлении полярной оси Z — порядка 10 мкм. Эти значения хорошо согласуются с данными, полученными при помощи метода Мерца (см. рис. 1, а).

Совершенно иной характер ГВГ наблюдался в кристаллах НБН со слоистой доменной структурой. Домены-слои в НБН повторяют конфигурацию слоев роста [2]. Последние при определенных условиях выращивания монокристаллов образуют периодическую структуру. В отличие от рассеяния на микродоменах, ГВГ в кристаллах с периодическим расположением доменов-слоев происходит под строго определенными углами, так как разрешены только значения $|\mathbf{q}|$, кратные $2\pi/L$,

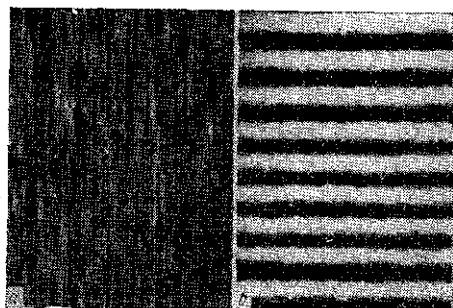


Рис. 1. Доменная структура исследованных образцов НБН: кристалл с микродоменами (а); кристалл со слоистой доменной структурой (б). Увеличение $\times 353$

где Λ — период доменной структуры. Направление вектора \mathbf{q} при этом перпендикулярно поверхностям слоев.

Рассеяние второй гармоники на слоистой доменной структуре («нелинейная дифракция» по терминологии, принятой в работе [7]) наблюдалась при распространении основного излучения в плоскости XZ кристалла. Направление колебаний для основной волны совпадало с осью Y , поэтому за процесс ГВГ отвечал нелинейный коэффициент d_{32} . Монодоменные кристаллы НБН при аналогичных условиях имеют фазовый синхронизм для процесса типа $oo-e$. При этом угол направления синхронной ГВГ с осью Z $\theta_c = 75^\circ$ (все углы даются для световых волн в кристалле при комнатной температуре).

Экспериментальная зависимость интенсивности второй гармоники $I^{2\omega}$ от угла θ между падающим лучом и осью Z показана на рис. 3, а. Образец представлял собой пластинку X -среза толщиной 2,22 мм, период доменной структуры $\Lambda = 12$ мкм. Луч ОКГ фокусировался на образец сферической линзой с фокусным расстоянием 10 см, что позволяло выбрать участок с наиболее периодической системой доменов. Для изучения зависимости $I^{2\omega}(\theta)$ кристалл поворачивался вокруг оси Y . Диапазон измерения $I^{2\omega}$ регистрирующей аппаратурой составлял 2,5 порядка, верхняя граница диапазона устанавливалась по максимальной наблюдавшейся интенсивности. Интенсивность второй гармоники была

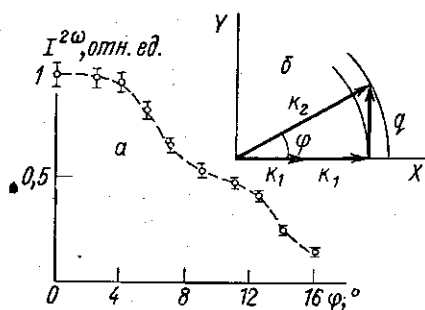


Рис. 2. ГВГ в кристалле НБН с микродоменами. Зависимость интенсивности второй гармоники от угла рассеяния φ в плоскости XU (а). Схема рассеяния. Сплошными кривыми показаны участки поверхностей волновых векторов $2k_1$ и k_2 (б).

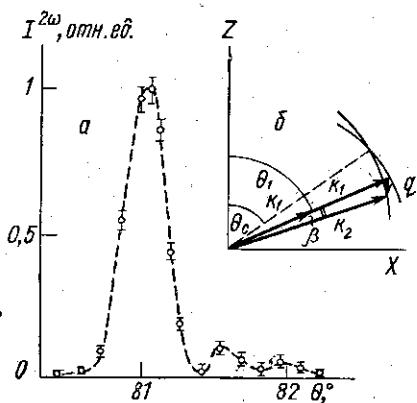


Рис. 3. ГВГ в кристалле со слоистой доменной структурой: зависимость $I^{2\omega}(\theta)$ в окрестности $\theta = 81^\circ$ (а); схема квазисинхронного процесса при $\theta = \theta_1$ (б). Пунктиром показано направление синхронной ГВГ для монодоменного кристалла

пренебрежимо малой во всем исследованном интервале углов θ (от 70 до 90°) по сравнению с интенсивностью в окрестности $\theta = 81^\circ$. Нелинейное взаимодействие при $\theta = 81^\circ$ было неколлинеарным. Угол β между направлением основного излучения и лучом второй гармоники составлял $1,2^\circ$. Расчет векторного треугольника (1) для первого порядка рассеяния (когда $|\mathbf{q}| = 2\pi/\Lambda$) дал значения $\theta_1 = 82,1^\circ$ и $\beta_1 = 1,12^\circ$. Таким образом, полученные данные хорошо объясняются в рамках теории нелинейного рассеяния света на доменах.

Имея в виду возможные практические приложения ГВГ в кристаллах с периодической системой доменов, необходимо отметить следующее: абсолютные масштабы кривых, изображенных на рис. 2, а и

рис. 3, а, отличаются на три порядка. Причина этого в том, что взаимодействие для неупорядоченной доменной структуры является несинхронным, $I^{2\omega}$ нарастает (в приближении заданного поля) пропорционально длине кристалла, тогда как в случае кристалла с периодической доменной структурой пик при $\theta = 81^\circ$ соответствует эффективному «квазисинхронному» взаимодействию, когда $I^{2\omega}$ нарастает пропорционально квадрату длины. Теоретически последний случай был предсказан А. С. Чиркиным в 1966 г. [8]. Им же была отмечена несколько меньшая эффективность квазисинхронных процессов по сравнению с синхронными. В данной работе измерений абсолютного выхода второй гармоники не проводилось, однако можно дать оценку максимальной эффективности ГВГ на слоистой доменной структуре в приближении заданного поля. Для идеально периодической структуры с бесконечно тонкими, плоскими границами раздела доменов $I^{2\omega}(\theta_1) = (4/\pi^2) I^{2\omega}(\theta_c)$, где $I^{2\omega}(\theta_c)$ — интенсивность второй гармоники для монокристалла в условиях фазового синхронизма.

Как минимум два фактора должны были сделать значение $I^{2\omega}(\theta_1)$ более низким. Во-первых, образцы НБН всегда содержат некоторое количество микродоменов. Во-вторых, измеренная угловая ширина пика квазисинхронной ГВГ составляла $22'$, тогда как рассчитанное идеальное значение — $12'$. Уширение пика объясняется разбросом в толщинах доменов-слоев на уровне 5% среднего значения.

Была также изучена ГВГ в сегнетоэлектрических кристаллах ниобата бария—лития и калия—лития. Эти соединения родственны НБН и кристаллизуются в том же структурном типе тетрагональной калиево-вольфрамовой бронзы. Основные разновидности доменной структуры этих кристаллов оказались подобными упомянутым разновидностям доменной структуры НБН. Небольшие отличия заключаются только в размерах микродоменов: для кристаллов ниобата бария—лития минимальный поперечный размер микродоменов равен 0,7 мкм.

Подобие доменных структур исследованных кристаллов можно приписать как сходство их кристаллических структур, так и близости температур сегнетоэлектрических фазовых переходов, расположенных в области 400—600°C у этих соединений. При таких температурах высокая электропроводность позволяет образовываться «заряженным» доменным стенкам, перпендикулярным полярной оси кристаллов. Границы раздела доменов-слоев и являются такими «заряженными» стенками у кристаллов, выращиваемых вдоль полярной оси Z . У кристаллов ниобата бария—стронция с температурой фазового перехода около 60°C нам не удалось обнаружить домены-слои, хотя они и обладали ярко выраженными слоями роста. По-видимому, деполяризующее поле, соответствующее доменным конфигурациям с «заряженными» стенками, препятствует возникновению доменов-слоев у ниобата бария—стронция.

Несмотря на то что фазовый переход у ниобата бария—стронция является размытым, нельзя, очевидно, полагать, что неизвестный пока механизм образования доменов-слоев работает только у сегнетоэлектриков с фазовым переходом, сосредоточенным в узкой температурной области. Данные, полученные по методике ДТА для образцов ниобата калия—лития, свидетельствуют о растянутости у них сегнетоэлектрического фазового перехода на 100—150°C. Механизм образования доменов-слоев достаточно фундаментален и не связан с деталями фазового перехода в указанных кристаллах. Для выяснения этого механизма необходимы эксперименты по исследованию температурной зависимости параметров доменной структуры в области фазовых переходов.

Нелинейное рассеяние света на доменах наиболее перспективно в этом отношении.

Автор благодарен Л. М. Казаряну за предоставление образцов кристаллов ниобата бария — лития и ниобата калия — лития, В. В. Воронову за предоставление образцов ниобата бария — стронция и С. М. Салтиелу за помощь в проведении ряда экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Van Uitert L. G., Levinstein H. J., Rubin J. J., Capio C. D., Dearborn E. F., Bonner W. A. Some characteristics of niobates having «filled» tetragonal tungsten bronze-like structures.—*Mat. Res. Bull.*, 1968, 3, N 1, p. 47—58. [2] Александровский А. Л., Маскаев Ю. А., Наумова И. И. Эффект электрооптической дифракции света на ростовой доменной структуре кристаллов барий-натриевого ниобата.—*ФТТ*, 1975, 17, № 11, с. 3197—3200. [3] Ballman A. A., Kurtz S. K., Brown H. Some effects of melt stoichiometry on the optical properties of barium sodium niobate.—*J. Cryst. Growth*, 1971, 10, N 2, p. 185—189. [4] Dolino G. Effects of domain shapes on second-harmonic scattering in triglycine sulfate.—*Phys. Rev.*, 1972, B6, N 10, p. 4025—4035. [5] Weinmann D., Vogt H. Second harmonic light scattering by laminar ferroelectric domains.—*Phys. Stat. Sol.*, 1974, A23, N 2, p. 463—472. [6] Ахманов А. С., Дубовик А. Н., Салтиел С. М., Томов И. В., Тункин В. Г. Нелинейные оптические эффекты 4-го порядка по полю в кристалле формиата лития.—*Письма в ЖЭТФ*, 1974, 20, № 4, с. 264—268. [7] Freund I. Nonlinear diffraction.—*Phys. Rev. Lett.*, 1968, 21, p. 1404—1406. [8] Чиркин А. С. О генерации второй гармоники в полидоменных кристаллах.— В кн.: *Нелинейная оптика*. Новосибирск.: Наука, 1968, с. 202—207.

Поступила в редакцию
10.01.80

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1981, Т. 22, № 6

УДК 521.13

О СИММЕТРИИ ОГРАНИЧЕННОЙ ЗАДАЧИ ТРЕХ ТЕЛ

Л. Г. Лукьянов

(ГАИШ)

В качестве исходных уравнений движения тела нулевой массы в ограниченной задаче трех тел рассмотрим уравнения Нехвила [1]

$$x'' - 2y' = \frac{\partial \Omega}{\partial x}, \quad y'' + 2x' = \frac{\partial \Omega}{\partial y}, \quad (1)$$

$$z'' = \frac{\partial \Omega}{\partial z},$$

где

$$\Omega = \frac{1}{1 + e \cos v} \left(\frac{x^2 + y^2}{2} - \frac{z^2}{2} e \cos v + \frac{1 - \mu}{r_1} + \frac{\mu}{r_2} \right),$$

$$r_1^2 = (x + \mu)^2 + y^2 + z^2,$$

$$r_2^2 = (x + \mu - 1)^2 + y^2 + z^2,$$

v , e — соответственно истинная аномалия и эксцентриситет орбиты основных тел. Штрихи обозначают дифференцирование по независимой переменной v . Постоянная тяготения, сумма масс основных тел и расстояние между ними приняты в качестве единиц измерения.