

УДК 534.2

ЛАЗЕРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН НА ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЕ В НИОБАТЕ ЛИТИЯ

© 2000 г. А. В. Голенищев-Кутузов, В. А. Голенищев-Кутузов, Р. И. Калимуллин

Казанский энергетический институт

420066, Казань, Красносельская, 51

E-mail: ADM@KFMEI.KSU.RU

Поступила в редакцию 30.06.99 г.

Обнаружена генерация когерентных акустических колебаний при воздействии лазерных импульсов на периодическую доменную структуру, сформированную в монокристалле ниобата лития. Установлено, что эффективное возбуждение акустических волн происходит при равенстве длины генерируемой волны периоду доменной структуры. Предложенный механизм оптической генерации акустических колебаний основан на процессе фотогенерации свободных носителей, компенсирующих поле поляризации внутри доменов, и возникновении переменных упругих напряжений вследствие пьезоэффекта.

Разработанные в последние годы способы формирования периодических доменных структур (ПДС) в сегнетоэлектриках позволили получить новую информацию о взаимодействии когерентного оптического излучения с такими структурами и расширить сферу их применения в нелинейной оптике [1]. При этом основное внимание было обращено на генерацию второй гармоники лазерного излучения, теоретическое обоснование которой было дано Бломбергом еще в 1962 г. [2]. Однако такие нецентросимметричные сегнетоэлектрики как ниобат и танталат лития, титанат бария обладают и сильным пьезоэффектом, что приводит к большому многообразию взаимодействий внешних полей с ПДС.

В настоящей работе сообщается об обнаружении генерации когерентных акустических колебаний при воздействии лазерных импульсов на сформированную в ниобате лития периодическую доменную структуру.

Следует отметить, что ранее в ряде теоретических работ [3–5] уже рассматривались возможности лазерной генерации акустических волн на решетке пространственного заряда, названной голографической решеткой. Такие решетки формировались оптическим излучением в фоторефрактивных кристаллах. Этот эффект был экспериментально обнаружен П.А. Пятаковым с сотрудниками [6]. Главная особенность полученных ими результатов состоит в том, что генерация импульсов акустических волн возникает в процессе стирания зарядовой структуры при ее облучении лазерным импульсом. Следовательно, последующая генерация акустических волн возможна только после нового формирования голографической решетки вспомогательным лазером. Позднее был предло-

жен вариант генерации импульсов акустических волн при облучении фотопроводящего пьезоэлектрика непосредственно лазерным импульсом с периодическим распределением интенсивности [7]. Механизм генерации также связан с процессом записи или стирания поля пространственного заряда. Как будет показано ниже, механизм генерации акустических волн на периодической доменной структуре имеет много общего с генерацией на голографической решетке, однако при этом не происходит стирания доменной структуры.

Экспериментальное изучение лазерной генерации акустических волн было проведено на прямоугольной пластине X-среза монокристалла ниобата лития. Образец содержал $\sim 10^{18}$ см⁻³ ионов железа с отношением концентраций ионов Fe²⁺/Fe³⁺ ~ 0.3 . Как было установлено ранее [8], именно при таких условиях возникает максимальная концентрация фотовозбужденных электронов. В средней части пластины предварительно путем приложения периодически градиентного электрического поля была сформирована система из 50 сегнетоэлектрических доменов с шириной каждого ~ 50 мкм. Границы доменов были перпендикулярны оси поляризации (рис. 1). Методика подобного способа формирования периодических доменных структур изложена в [9]. На торцы пластины были нанесены металлические электроды, позволяющие осуществлять широкополосное детектирование акустических волн. Оптическое воздействие создавалось с помощью однородного пучка второй гармоники лазера на YAG : Nd³⁺ ($\lambda = 0.53$ мкм), проецировавшегося на поверхность образца в виде полоски 10×2 мм². Облучение осуществлялось последовательностью импульсов с плотностью мощности 10^4 Вт/см²,

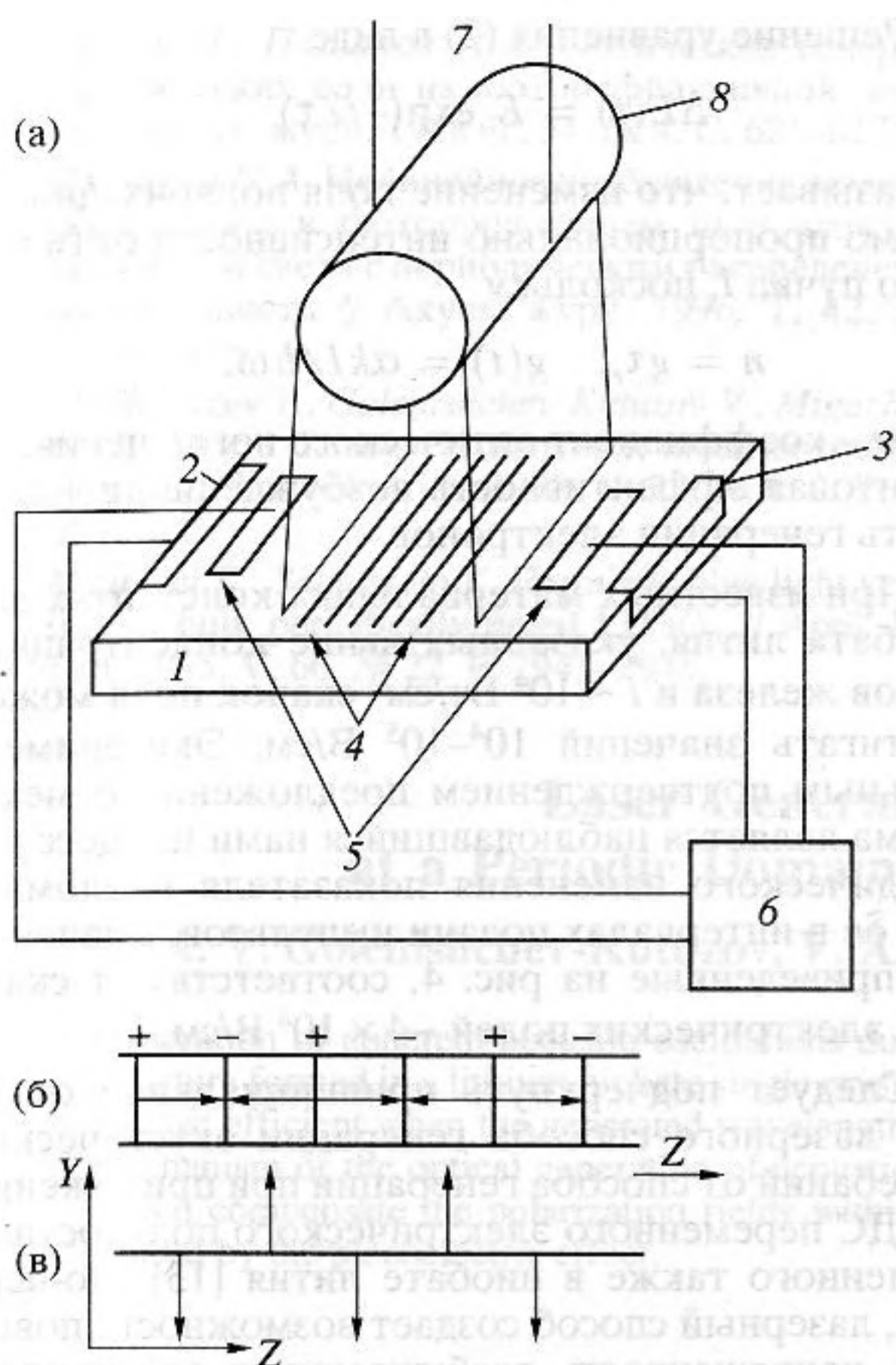


Рис. 1. Установка для исследования оптической генерации акустических волн на ПДС (а), направления полей поляризации (б) и пьезоэлектрических осей (в) в доменах:
 1 – образец; 2, 3 – торцевые преобразователи; 4 – структура доменов; 5 – емкостные датчики; 6 – осциллограф; 7 – лазерный пучок; 8 – цилиндрическая линза.

длительностью 1.2×10^{-7} с и частотой следования 10–50 Гц. Для измерения скачков напряженности электрического поля внутри доменов в момент воздействия лазерных импульсов использовался

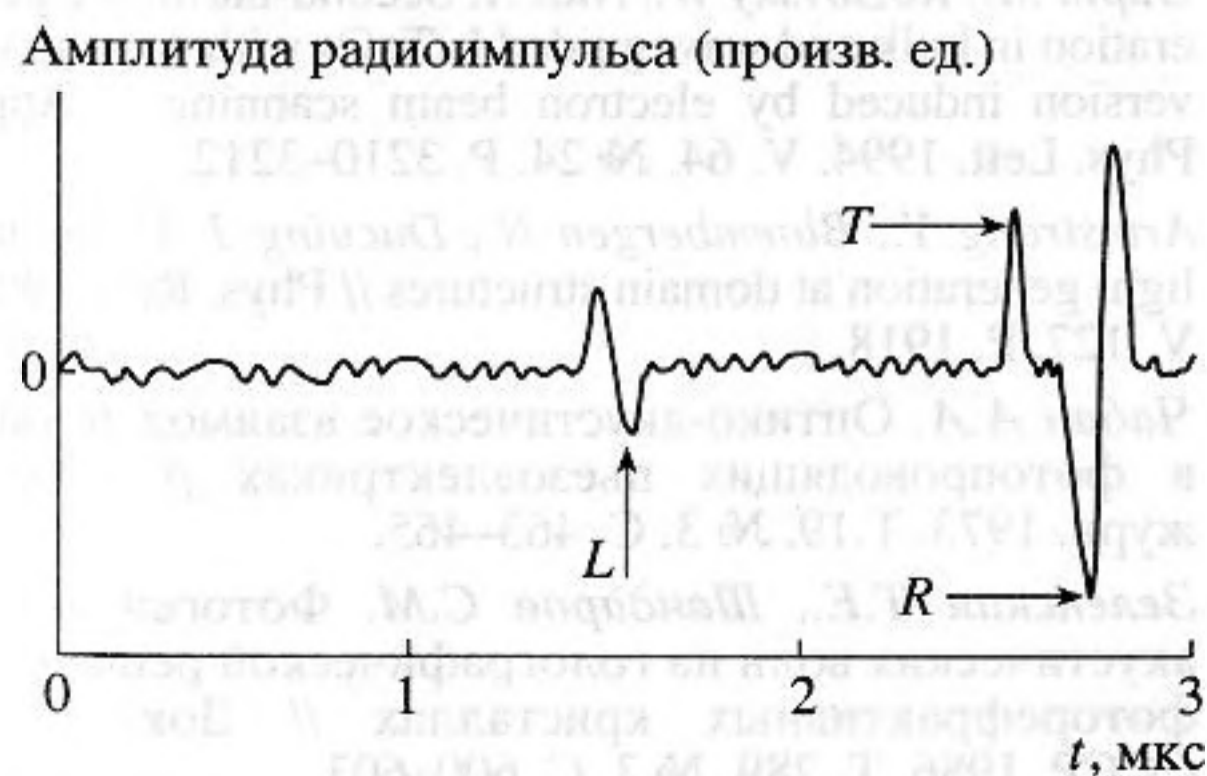


Рис. 2. Акустические сигналы, соответствующие продольной (L), поперечной (T) и поверхностной (R) волнам.

электрооптический эффект. Измерение показателя преломления производилось с помощью маломощного He–Ne лазера. При воздействии на область ПДС каждым лазерным импульсом на обоих акустических преобразователях детектировались радиоимпульсы, соотнесенные по времени прохождения на детекторы как сигналы поверхностной акустической волны, продольной и поперечной компонент приповерхностной акустической волны (рис. 2). Центры частотного спектра этих типов волн, представленного на рис. 3, соответствуют условию равенства длины акустической волны периоду доменной структуры. Амплитуда относительных деформаций в акустической волне достигала значений $\sim 10^{-4}$.

Известно [10], что генерация упругих колебаний под действием модулированного лазерного излучения наиболее эффективно возникает за счет периодического термоупругого процесса. Как показали наши эксперименты [11], термоупругая генерация в таких прозрачных материалах как ниобат лития эффективна только при нанесении на поверхность поглощающего слоя ($a_{abs} \geq 10^2 \text{ см}^{-1}$), а частотный диапазон генерируемых волн определяется длительностью лазерных импульсов.

Нами предложен альтернативный механизм, заключающийся в фотогенерации большого количества электронов, экранирующих поля поляризации внутри сегнетоэлектрических доменов. Возникающие при этом скачки электрических полей вследствие обратных знаков пьезоэлектрических коэффициентов в соседних доменах создают переменные деформации на границе доменов. Таким образом, ПДС можно представить (рис. 1в) в виде системы периодически расположенных источников акустических колебаний, которые распространяются в обе стороны от ПДС. Вследствие интерференции колебаний, излучаемых каждым источником, эффективная генерация акустичес-

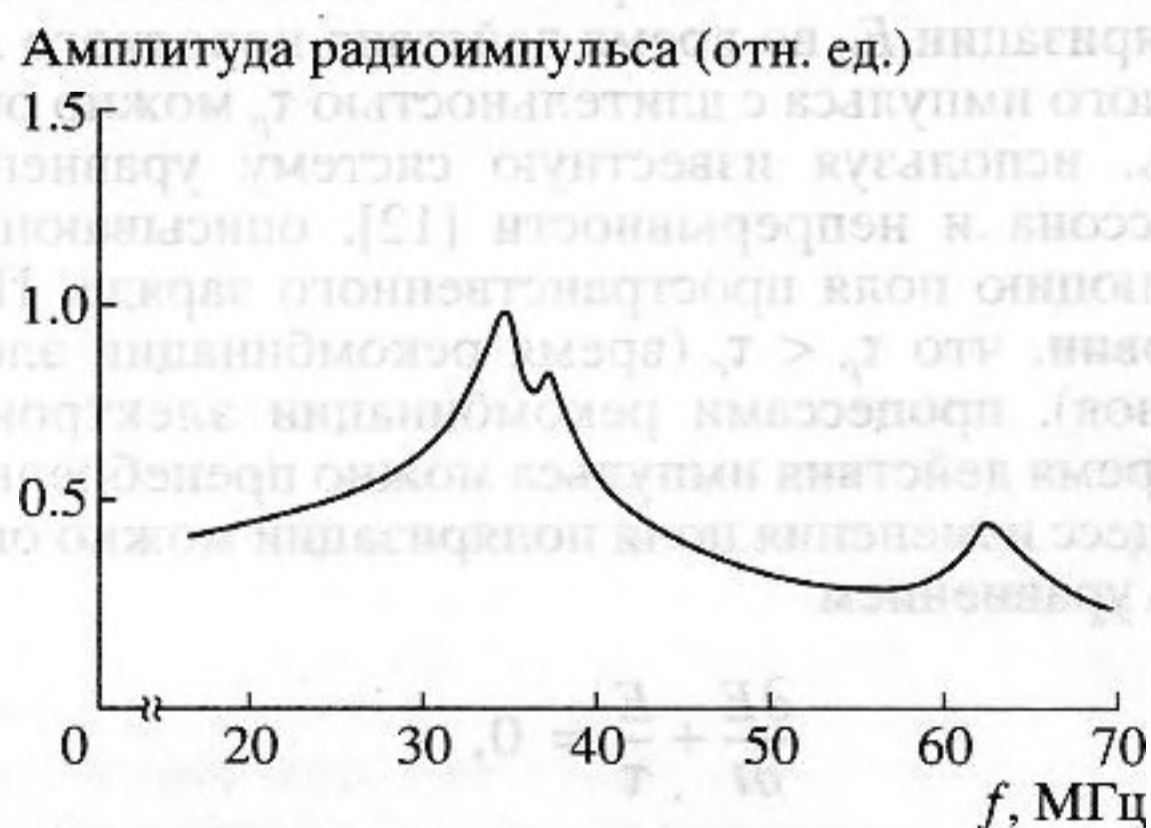


Рис. 3. Частотный спектр возбуждаемых на ПДС акустических волн.

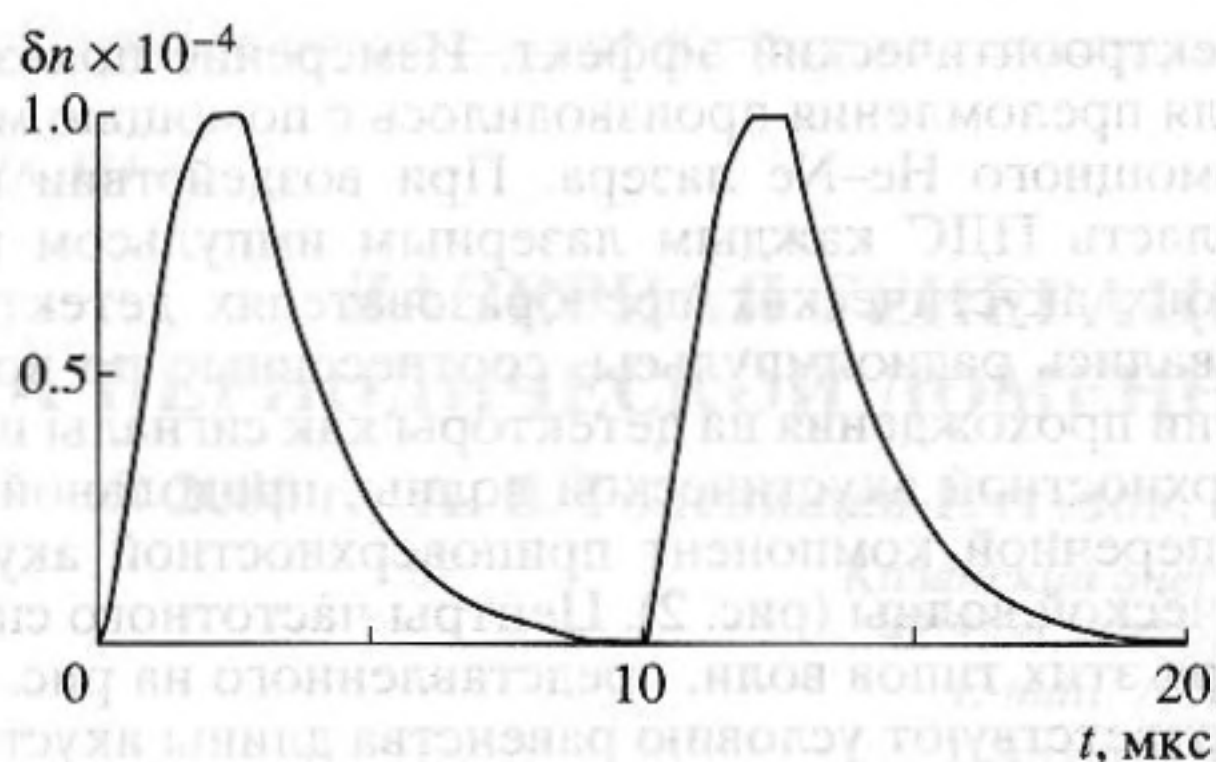


Рис. 4. Периодическое изменение показателя преломления при подаче оптических импульсов.

ких волн возможна на частотах, удовлетворяющих условию

$$f = nV/d, \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad d = d_+ + d_-, \quad (1)$$

где d_+ и d_- — ширина доменов с прямой и инвертированной поляризацией, V — скорость распространения акустических волн.

После окончания воздействия лазерного импульса происходит релаксация индуцированного поля. При определенном соотношении между скважностью импульсов и временем релаксации к моменту подачи следующего импульса могут восстанавливаться значения полей поляризации внутри доменов.

Известно, что ниобат лития относится к группе кристаллов, обладающих сильным фотовольтаическим полем. Это поле возникает за счет пространственной перезарядки примесных ионов с переменной валентностью, например ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} . Напряженность этого поля может достигать значений 10^5 В/см [12]. В нашем случае при однородном облучении происходит только фотогенерация большого количества свободных электронов n .

Значения скачкообразного изменения поля поляризации E_0 во время действия короткого лазерного импульса с длительностью τ_p можно оценить, используя известную систему уравнений Пуассона и непрерывности [12], описывающих эволюцию поля пространственного заряда. При условии, что $\tau_p < \tau_r$ (время рекомбинации электронов), процессами рекомбинации электронов во время действия импульса можно пренебречь, и процесс изменения поля поляризации можно описать уравнением

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{E}{\tau} = 0, \quad (2)$$

где $\tau = \epsilon\epsilon_0/en\mu$; μ , n — соответственно подвижность и концентрация фотовозбужденных электронов.

Решение уравнения (2) в виде

$$\Delta E(t) = E_0 \exp(-t/\tau) \quad (3)$$

показывает, что изменение поля поляризации ΔE прямо пропорционально интенсивности оптического пучка I , поскольку

$$n = g\tau_r; \quad g(t) = \alpha kI/\hbar\omega, \quad (4)$$

где α — коэффициент оптического поглощения, k — квантовая эффективность возбуждения, g — скорость генерации электронов.

При известных материальных константах для ниобата лития, указанных выше концентрациях ионов железа и $I \sim 10^4$ Вт/см² скачок поля может достигать значений 10^4 – 10^5 В/см. Экспериментальным подтверждением предложенного механизма является наблюдавшийся нами процесс периодического изменения показателя преломления Δn в интервалах подачи импульсов. Значения Δn , приведенные на рис. 4, соответствуют скачкам электрических полей $\sim 4 \times 10^4$ В/см.

Следует подчеркнуть принципиальное отличие лазерного способа генерации акустических колебаний от способа генерации при приложении к ПДС переменного электрического поля, осуществленного также в ниобате лития [13]. Во-первых, лазерный способ создает возможность повысить напряженность возбуждающих электрических полей на 1–2 порядка и тем самым увеличить эффективность акустооптических устройств обработки сигналов. Во-вторых, и это по-видимому самое главное, создается новая возможность исследования процессов и механизмов взаимодействия лазерного излучения с возбужденными носителями.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 99-02-17593).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gupta M., Kozlovsky W., Nutt A. Second-harmonic generation in bulk and waveguided LiTaO_3 with domain inversion induced by electron beam scanning // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. № 24. P. 3210–3212.
2. Armstrong Y., Bloembergen N., Ducuing J. Harmonic light generation at domain structures // Phys. Rev. 1962. V. 127. P. 1918.
3. Чабан А.А. Оптико-акустическое взаимодействие в фотопроводящих пьезоэлектриках // Акуст. журн. 1973. Т.19. № 3. С. 463–465.
4. Зеленская Т.Е., Шандаров С.М. Фотогенерация акустических волн на голографической решетке в фоторефрактивных кристаллах // Докл. АН СССР. 1986. Т. 289. № 3. С. 600–603.
5. Alig R. Acoustic diffraction and the electrostrictive transducer // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. № 9. P. 3731–3737.

6. Деев В.Н., Пятаков П.А. Оптическая генерация акустических волн на фоторефрактивной решетке // Акуст. журн. 1988. Т. 34. № 4. С. 621–627.
7. Пятаков П.А. Нелинейное возбуждение акустической волны в фотопроводящем пьезоэлектрике импульсом света с периодическим распределением интенсивности // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 6. С. 840–945.
8. Vladimirtzev Y., Golenishchev-Kutuzov V., Migachev S. et al. Optical damage in transition metal doped ferroelectrics // Ferroelectrics. 1978. V. 22. № 1–2. P. 653–654.
9. Mizuuchi K., Yamamoto K. Harmonic blue light generation in bulk periodically poled LiTaO₃ // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. № 22. P. 2943–2945.
10. Лямшев Л.М. Оптоакустические источники звука // УФН. 1981. Т. 135. С. 637–669.
11. Голенищев-Кутузов А.В., Мигачев С.А., Яфеев И.Р. Генерация поверхностных акустических волн с помощью импульсов лазерного излучения // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 5. С. 671–672.
12. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука, 1992.
13. Zhu Y., Ming N., Jiang W. Acoustic superlattice of LiNbO₃ crystals and its application to bulk-wave transducers for ultrasonic generation and detection only to 800 MHz // Phys. Rev. 1989. B40. P. 8536.

Laser Generation of Acoustic Waves at a Periodic Domain Structure in Lithium Niobate

A. V. Golenishchev-Kutuzov, V. A. Golenishchev-Kutuzov, and R. I. Kalimullin

Generation of coherent acoustic oscillations due to the interaction of laser pulses with the periodic domain structure formed in a lithium niobate single crystal is observed. It is found that the excitation of acoustic waves is most efficient when the generated wavelength is equal to the period of the domain structure. The proposed mechanism of the optical generation of acoustic oscillations consists of the photogeneration of free carriers, which compensate the polarization fields within the domains, in the presence of alternating elastic stresses caused by the piezoelectric effect.