

Преобразование частоты акустических изгибных колебаний в свободно подвешенной сегнетоэлектрической жидкокристаллической пленке

С. В. Яблонский^{+*}□, К. Накано⁺¹⁾, М. Озаки⁺¹⁾, К. Йошино⁺¹⁾

⁺ Department of Electronic Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University, Osaka 565-0871, Japan

^{*} Institute of Crystallography RAS, 117333 Moscow, Russia

□ Институт кристаллографии РАН, 117333, Москва, Россия

Поступила в редакцию 26 декабря 2002 г.

Экспериментально обнаружен нелинейный акустический эффект в свободно подвешенной сегнетоэлектрической жидкокристаллической пленке. Нелинейный эффект проявлялся в изменении частоты изгибных колебаний пленки под действием переменного электрического поля. Эффективность преобразования с повышением и понижением частоты составила 50% и 30%, соответственно.

PACS: 68.15.+e, 68.10.Et, 68.10.Cr, 62.30.+d

Параметрическое преобразование с повышением частоты широко используется в оптике и представляет собой метод, в котором инфракрасное излучение смешивается с когерентным излучением гетеродина в оптически нелинейном материале [1]. На природу колебательных систем, в которых возможно параметрическое взаимодействие, не накладывается никаких физических ограничений. Ими могут быть электромагнитные, акустические или механические системы или их комбинации. В настоящей работе эффект параметрического преобразования частоты демонстрируется на примере исследования механических колебаний свободно подвешенной пленки, полученной из сегнетоэлектрического жидкого кристалла. В эксперименте в качестве источника “накачки” использовались колебания, индуцированные с помощью электромеханического эффекта [2], а в качестве преобразуемого сигнала – акустические колебания, вызванные периодическим тепловым расширением окружающего воздуха [3].

В отличие от жидкого кристалла, помещенного в плоский стеклянный капилляр, поверхность свободно подвешенной пленки легко деформируется при воздействии слабых акустических или электрических полей [4]. Такая пленка с точки зрения механики представляет собой высокочувствительную систему, колебательное движение которой может быть описано теорией Рэлея, основанной на предположении, что собственные частоты такой пленки в пренебрежении влиянием мениска и окружающего газа зависят лишь

от изотропного поверхностного натяжения σ и однородной двумерной плотности $\rho_s = h\rho_{LC}$, где ρ_{LC} обозначает объемную плотность пленки, h – ее толщину, варьируемую на практике от сотен молекулярных длин до одного бимолекулярного слоя [5] (для плоской мембраны произвольной формы собственные частоты $\nu \sim \sqrt{\sigma/\rho_s}$). В реальной ситуации для адекватного описания механического колебательного движения пленки следует учесть диссипацию энергии, связанную с вязким течением жидкого кристалла в плоскости пленки, ее нелинейность, а также наличие окружающей атмосферы. С учетом диссипации энергии уравнение движения свободно подвешенной пленки, ограниченной рамкой обычно в виде прямоугольной или круглой диафрагмы, запишется в виде дифференциального уравнения [2], в которое добавлен нелинейный член Dz^2 , где D – так называемый коэффициент нелинейности [1]:

$$2\sigma\Delta z + (f_{sz}(x, y)e^{i\nu_1 t} + \text{к.с.}) + (g_{sz}(x, y)e^{i\nu_2 t} + \text{к.с.}) = \frac{\eta_s}{a^2} \frac{dz}{dt} + \rho_s^{\text{eff}} \frac{d^2 z}{dt^2} + Dz^2, \quad (1)$$

где к.с. означает “комплексная сопряженная величина”, z – смещение поверхности пленки от равновесного положения, a – диаметр отверстия, η_s – поверхностная вязкость пленки жидкого кристалла, $h = Nl$ – толщина пленки, N – число смектических слоев, l – толщина смектического слоя, ν – частота, $f_{sz}(x, y)$ и $g_{sz}(x, y)$ – амплитуды поверхностной плотности сил периодически меняющихся с частотой ν_1 и ν_2 , соответственно, ρ_s^{eff} – поверхностная плотность, равная $\rho_{LC}h + \rho_{\text{air}}H$, где ρ_{air} – объемная плотность

¹⁾ Kazuyuki Nakano, Masanori Ozaki and Katsumi Yoshino

воздуха, а H – высота столба присоединенной массы воздуха, вовлеченной в колебательное движение [6].

Уравнение (1) можно интерпретировать как уравнение линейной акустики при наличии в среде сторонних воздействий, характеризуемых квадратичной поправкой Dz^2 . Нелинейный член Dz^2 в уравнении (1) связан с асимметрией реактивной возвращающей силы, действующей на поверхность свободно подвешенной пленки. Такая асимметрия и является причиной появления суммарной и разностной частот в спектре изгибных колебаний пленки.

Для получения свободно подвешенных пленок использовалась стандартная процедура, описанная в работе [7]. Пленка из сегнетоэлектрического жидкого кристалла CS-1029 (кристалл – 18°C — SmC* – 73°C — SmA – 85°C — N* – 95°C — изотропная жидкость) формировалась на круглом отверстии диаметром 5 мм, выполненном в стеклянной пластинке толщиной 1 мм. Пленку получали при температуре смектической A-фазы, с последующим охлаждением до смектической C-фазы. Перед началом измерения, для устранения статических дефектов, пленка обычно выдерживалась в течение нескольких часов в смектической A-фазе. Для подведения переменного электрического напряжения на поверхность стекла наносились электроды из SnO₂. Рамка с пленкой крепилась на термостатируемом столике. Температуру пленки измеряли с помощью калиброванной медь-константановой термопары. Толщину пленки рассчитывали из спектра отражения [7], а сам спектр отражения получали с помощью многоканального анализатора спектра. Синусоидальное напряжение с амплитудой, варьируемой от 1 до 120 В, и частотой ν_1 вызывало периодическую во времени и пространстве деформацию пленки. Деформация возникла вследствие электромеханического эффекта, являющегося результатом взаимодействия электрического поля со спонтанной поляризацией сегнетоэлектрического жидкого кристалла [2, 8]. Амплитуду вибраций измеряли по отклонению отраженного лазерного луча от произвольного участка пленки с помощью позиционно-чувствительного детектора, состоящего из щелевой диафрагмы и кремниевого фотодиода, см. рис.1. Луч He-Ne-лазера с поляризацией, совпадающей по направлению с низкочастотным управляющим электрическим полем E (s -поляризация), направлялся под углом 45° к нормали пленки. Площадь зондируемого локального участка пленки составляла не более $0.5 \times 0.5 \text{ мм}^2$. Ток фотодиода анализировали фурье-спектрометром и синхронным детектором, измеряющим сигнал как на первой, так и на второй гармонике синусоидального электрического поля. Из-

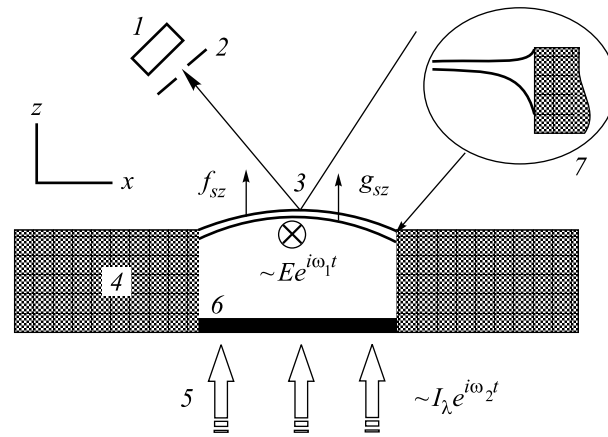


Рис.1. Схема эксперимента: 1 – кремниевый фотодиод, 2 – щелевая диафрагма, 3 – свободно подвешенная пленка из сегнетоэлектрического жидкого кристалла CS-1029, 4 – стеклянная рамка с круглым отверстием с диаметром, равным 5 мм, 5 – амплитудно-модулированное излучение полупроводникового лазера ($\lambda = 650 \text{ нм}$, $W = 25 \text{ мВт}$), 6 – тонкий поглощающий слой черной туши толщиной 5 мкм, 7 – увеличенное изображение мениска. Направление переменного электрического поля E перпендикулярно плоскости рисунка

меряемый сигнал на первой гармонике был прямо пропорционален амплитуде вертикального смещения пленки. Оптический отклик на второй гармонике в основном являлся следствием артефакта, связанного с нелинейностью позиционно-чувствительного детектора, а также следствием изменения френелевского коэффициента отражения, являющегося четной функцией от поля E , и, наконец, нелинейности, связанной с асимметрией возвращающей силы.

Одновременно с колебаниями на частоте ν_1 в пленке с помощью внешнего воздействия индуцировались колебания на частоте ν_2 . Для возбуждения колебания на частоте ν_2 модулированное излучение 5 полупроводникового лазера периодически нагревало зачерненную пленку 6, которая, в свою очередь, нагревала замкнутый объем воздуха, контактирующий со свободно подвешенной пленкой 3, рис.1. Периодическое температурное расширение воздуха приводило к периодической деформации пленки, также регистрируемой с помощью позиционно-чувствительного детектора по отклонению лазерного луча. На рис.2 показана частотная зависимость амплитуды вибраций свободно подвешенной пленки, возбуждаемых путем периодического нагрева воздуха и последующего периодического изменения его объема. Видно, что несмотря на высокую объемную вязкость смектического жидкого кристалла ($\eta[25^\circ\text{C}] = 270 \text{ мПа} \cdot \text{с}$), спектр имеет ярко выраженный резонансный характер, а

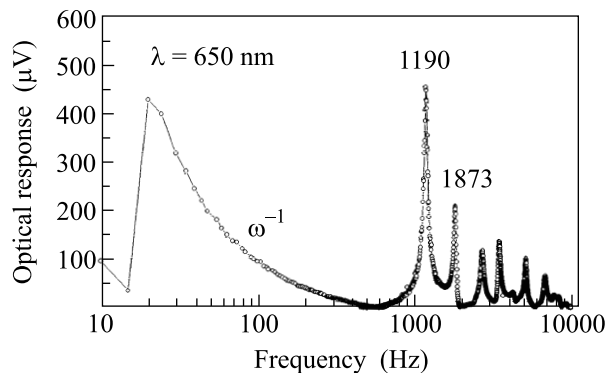


Рис.2. Спектр механических колебаний свободно подвешенной пленки, индуцированных переменным давлением воздуха. Напряжение 10 мВ, снимаемое с фотодиода, соответствует смещению пленки 0.8 мкм. Числа рядом с пиками показывают величины двух первых резонансов в герцах (CS-1029, $N = 345$ слоев, $l = 2.8$ нм, $T = 23^\circ\text{C}$)

амплитуда вибраций на резонансной частоте 1190 Гц превышает амплитуду колебаний пленки на низких частотах в интервале $0 < \nu < 100$ Гц.

Основной результат, иллюстрирующий параметрическое частотное преобразование в сегнетоэлектрической пленке, показан на рис.3. На этом рисун-

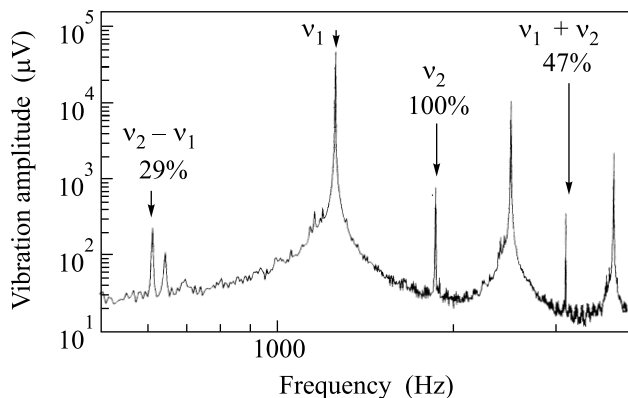


Рис.3. Фурье-спектр отклика свободно подвешенной пленки (CS-1029, $N = 345$ слоев) на воздействие двух гармонических сил. К пленке прикладывали переменное синусоидальное напряжение с амплитудой $U = 40$ В и частотой $\nu_1 = 1259.692$ Гц (точность определения частоты составляла 0.001 Гц). Одновременно зачерненная пленка и, следовательно объем воздуха, контактирующий со свободно подвешенной пленкой, нагревались амплитудно-модулированным излучением полупроводникового лазера на частоте $\nu_2 = 1873.389$ Гц, $\lambda = 650$ нм, $W = 25$ мВт. Числа в процентах соответствуют степени конверсии механического колебания на частоте $\nu_2 = 1873.389$ Гц в колебания на суммарной и разностной частотах (100% соответствует напряжению сигнала $8.354 \cdot 10^{-4}$ В)

ке изображен фурье-спектр механического отклика свободно подвешенной пленки на воздействие двух гармонических сил. С помощью электромеханического эффекта на частоте $\nu_1 = 1259.692$ Гц (несколько большей частоты первого резонансного максимума) возбуждалось колебание “накачки”, взаимодействующее с относительно слабым колебанием, возбуждаемым на частоте $\nu_2 = 1873.389$ Гц (частоте второго резонансного максимума) с помощью переменного давления воздуха. В результате нелинейного взаимодействия в фурье-спектре появлялись два новых колебания на суммарной ($\nu_1 + \nu_2 = 3133.081$ Гц) и разностной ($\nu_2 - \nu_1 = 613.697$ Гц) частотах. Сигнал на разностной частоте, как и следует из теории, был значительно меньше сигнала на суммарной частоте [9]. (Эффективность конверсии оказалась 50% и 30% для преобразования с повышением и понижением частоты, соответственно.)

Следует отметить, что к настоящему времени накопилось достаточное количество фактов, свидетельствующих в пользу более сложной, чем в допущении Рэлея, организации жидкокристаллических свободно подвешенных пленок. В литературе имеются сообщения, что для адекватного описания механических свойств свободно подвешенных пленок в ряде случаев необходимо учитывать такие факторы, как наличие объемной упругости [10], наличие мениска [11], тип мезофазы [12] или изменение толщины пленки в процессе ее колебательного движения [13]. В работе [3], например, было показано, что неоднородность пленки, связанная с наличием мениска, принимающим участие в колебательном процессе, радикальным образом изменяет ее спектральные характеристики. Если принять во внимание возможную асимметрию формы мениска 7, как это показано на рис.1, то естественным образом получает свое объяснение и появление нелинейности, ответственной за асимметрию упругих свойств свободно подвешенной пленки. В этом случае из чисто геометрических соображений приращение площади пленки с учетом ее переходной области (мениска) может отличаться в случае движения пленки вверх и вниз, что и будет соответствовать различному приращению поверхностного натяжения при деформации пленки и, следовательно, появлению асимметрии в действии возвращающей реактивной силы.

В заключение отметим, что нами продемонстрирован эффект смешения двух частот в нелинейной механической системе, представляющей собой плоскую сегнетоэлектрическую жидкокристаллическую пленку. Эффект может быть полезен для параметрического преобразования частоты в детекторах види-

мого и инфракрасного излучения (ячейках Голея [14–18]), в которых в качестве чувствительного элемента оптического микрофона может использоваться жидкокристаллическая мембрана [3]. Сдвиг с сторону повышения частоты позволяет увеличить скорость считывания сигнала ячейкой Голея, а также уменьшить влияние низкочастотных шумов.

Мы благодарим С.П. Палто за плодотворные дискуссии и “Grant-in-Aid for the Scientific Research from the Ministry of Education, Science, Sports and Culture (Japan)” за финансовую поддержку.

1. A. Yariv, *Introduction to Optical Electronics*, Holt, Rinehart, Winston, 1971, ch. 8.
2. С. В. Яблонский, А. С. Михайлов, К. Накано и др., *ЖЭТФ* **120**, 109 (2001).
3. V. Serguei, С. V. Yablonskii, Kazuyuki Nakano et al., *JJAP* (2003), to be published.
4. Sadahito Uto, Eisuke Tazoh, Masanori Ozaki, and Katsumi Yoshino, *J. Appl. Phys.* **82**, 2791 (1997).
5. P. M. Morse, *Vibration and sound*, McGraw Hill, New York, 1936, p. 142.
6. L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Fluid mechanics*, Course of theoretical physics, v. 6, Pergamon Press, Great Britain, 1987, p. 28.
7. P. Pieranski, L. Beliard, J.-Ph. Tournellec et al., *Physica A* **194**, 364 (1993).
8. A. Jakli, L. Bata, A. Vuka, and N. Eber, *Ferroelectrics* **69**, 153 (1986).
9. М. А. Исакович, *Общая акустика*, М.: Наука, 1973, стр. 422.
10. I. Kraus, Ch. Bahr, I. V. Chikina, and P. Pieranski, *Phys. Rev.* **E58**, 610 (1998).
11. M. Brazovskaya, H. Dumoulin, and P. Pieranski, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 1655 (1996).
12. P. E. Cladis, P. L. Finn, and H. R. Brand, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 1518 (1995).
13. A. Boudaoud, Y. Couder, and M. B. Amar, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 3847 (1999).
14. G. Chol, Y. Marfaing, M. Munsch et al., *Les détecteurs de rayonnement infra-rouge*, Dunod, Paris, 1966.
15. M. J. Golay, *Rev. Sci. Instr.* **18**, 357 (1947).
16. NASA Tech Brief, *Circuit for Automatic Tunneling-Controlled Golay Cell*, **23**, No.4, NPO-20035-1, April, 1999, с. 33.
17. A. H. Lumpkin, N. S. Sereno, and D. W. Rule, The book of abstracts 22nd International Free Electron Laser Conference and 7th FEL Users Workshop 13 to 18 August 2000 – Durham, North Carolina, USA, MO-4-10.
18. G. A. Krafft, P. Piot, K. Jordan, and J. Song, *Measuring and characterizing ultrashort bunches in the Jefferson Lab Free Electron Laser*, In the Proc. of Sixth European Particle Accelerator Conference (EPAC'98), 22-26 June, 1998, Stockholm, p. 1580.