

01;05;07;12

Наблюдение излучающего объемного солитона деформации в твердотельном волноводе

© Г.В. Дрейден,¹ А.М. Самсонов,¹ И.В. Семенова,¹ К.Р. Хуснутдинова²¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия² Loughborough University, Loughborough, LE11 3TU, UK
e-mail: samsonov@math.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 16 ноября 2010 г.)

Впервые экспериментально зарегистрировано возникновение и распространение излучающего объемного солитона упругой деформации в слоистых нелинейно-упругих волноводах с неидеальным контактом между слоями. Объяснена природа таких волн в рамках модели связанных уравнений типа Буссинеска.

Излучение, бегущее за солитоном, имеющим различную физическую природу, было найдено в ряде теоретических работ (см., например, [1–8]) и наблюдалось в численных и физических экспериментах (см., например, [9–11]). Оно представляет собой рябь (ripples) — движущийся волновой рельеф малой по сравнению с ведущим солитоном амплитуды, но не отстающий от него в силу разности скоростей, как это сделали бы вторичные солитоны в цуге или нерезонансная линейная радиация. С физической точки зрения рябь часто возникает вследствие наличия некоторой „дополнительной“ дисперсии в системе, наряду с той, которая необходима для уравновешивания имеющейся нелинейности и создания в результате устойчивых уединенных волн. В нелинейных уравнениях для соответствующей динамической системы это может описываться либо дисперсионными слагаемыми высокого порядка [1–5], либо слагаемыми, пропорциональными самой неизвестной функции [6,12], что более характерно для длинных волн в конденсированных средах. Одним из примеров служит динамика океанических слабонелинейных внутренних волн, резонансно взаимодействующих с поверхностным сдвиговым течением, что приводит к системе уравнений, имеющих решения в виде солитонов с рябью [8]. Излучение при распространении оптических солитонов описано в [9], где также найдены условия, при которых этого излучения можно избежать. Для наличия излучения у солитона важны не только параметры среды, но и диапазон длин уединенных волн: в [11] показано, что при поглощении фемтосекундных лазерных импульсов в тонкой алюминиевой пленке на кристалле GaAs образуются субпикосекундные акустические солитоны, сильно отличающиеся от обычных длинноволновых солитонов плотности. В [10] показано, что при наличии пятой производной в уравнении Кортевега–де-Вриза (КдВ) солитоны испускают излучение, то же справедливо при наличии 3-ей производной в нелинейном уравнении Шрёдингера (НУШ) [3,5]. Излучающие солитоны НУШ возникают благодаря высокочастотной дисперсионной добавке в исходное классическое нелинейное уравнение. Низкочастотная дисперсия (слагае-

мые, пропорциональные самой неизвестной функции) изучалась гораздо реже [6,12], так же как и системы уравнений [8,13].

Недавно в [14] было теоретически показано, что в двухслойном упругом волноводе при неидеальной склейке слоев возможно образование *резонансного* излучения (ряби) за солитоном упругой деформации, однако, как и во многих других случаях распространения солитонов в конденсированных средах, вопрос о наблюдении такого рода волновых картин оставался открытым. Рассмотрим процесс распространения солитона продольной упругой деформации по слоистому нелинейно-упругому волноводу с неидеальным контактом между слоями, т.е. в присутствии мягкого соединяющего слоя (например, резиноподобного клея). Формальное решение континуального аналога задачи о распространении волн в паре ангармонических цепочек диполей, связанных достаточно мягким промежуточным слоем, показало, что на смену обычному уравнению с двумя дисперсиями (УДД) [15] приходит система (безразмерных) связанных УДД с низкочастотными дисперсионными слагаемыми, пропорциональными разности линейных компонент деформаций в верхнем ($f \equiv u_x$) и нижнем ($g = w_x$) слоях [14]. Эта система была приведена к виду

$$f_{tt} - f_{xx} = (f^2/2 + f_{tt})_{xx} - \delta(f - g),$$

$$g_{tt} - c^2 g_{xx} = (\alpha g^2/2 + \beta g_{tt})_{xx} + \gamma(f - g), \quad (1)$$

где x — продольная координата вдоль волновода, t — время, u, w — компоненты смещений вдоль x в слоях, а постоянные ($\alpha, \beta, \gamma, \delta, c^2$) зависят от упругих и геометрических параметров. Если параметры таковы, что $\alpha = \beta = c = 1$, то при $f = g$ система (1) сводится к одному уравнению Буссинеска (физической причиной редукции является полная идентичность слоев) и порождает его обычное солитонное решение (см. [15]), однако, в деляминированном слоистом волноводе может возникать расщепление исходного солитона на несколько уединенных импульсов [16,17]. При неоднородности слоистого волновода с неидеальным контактом между

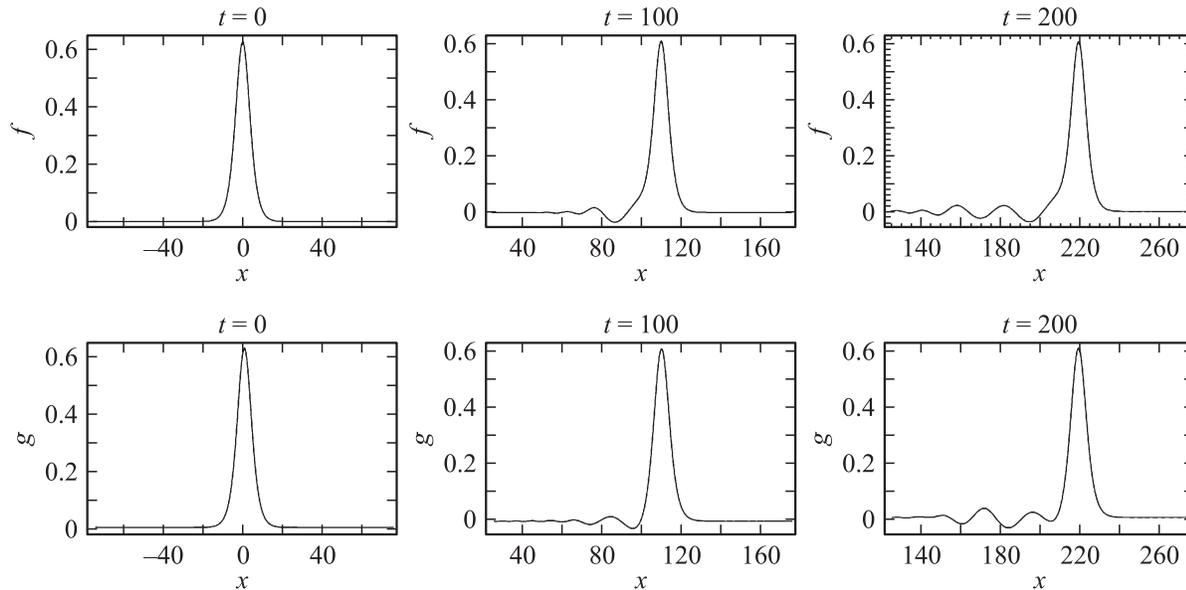


Рис. 1. Преобразование исходного первичного объемного солитона в солитон с рябью (излучающий солитон) из-за наличия резонансного излучения.

слоями, например при разной толщине слоев, теоретически возникает возможность преобразования исходного первичного объемного солитона в солитон с рябью (излучающий солитон) из-за наличия резонансного излучения, как было показано в численных экспериментах в [14]; см. также рис. 1, где изображены начальные стадии формирования ряби за солитоном в волноводе из двух слоев слегка разной толщины (параметры $\beta = 1.2$, $\nu = 1.1$, $\delta = 0.01$, $\alpha = c = 1$ в (1)) в три последовательных момента времени t . Здесь и на всех последующих рисунках волны распространяются слева направо.

Однако возможность наблюдать и детектировать излучающий объемный солитон деформации в твердотельном нелинейно-упругом слоистом волноводе нуждалась в экспериментальной проверке. В этих экспериментах была использована установка для генерации и наблюдения уединенных волн продольной деформации в упругих волноводах (см., например, [17,18]), состоящая из канала генерации уединенной волны из слабой ударной волны, полученной в результате взрывного вскипания тонкой пленки металла на подложке, синхронизированного с каналом голографической регистрации волновой картины. Образцами служили стержни из ПММА размером $1 \times 1 \times 50$ см, составленные из двух или трех почти одинаковых продольных слоев (немного варьируется их толщина). Для соединения слоев использовался клей „Момент“ на основе полихлоропреновых каучуков (РСП).

Возникновение длинной продольной уединенной волны — солитона деформации — основано на балансе физической нелинейности материала, геометрической нелинейности процесса деформации и дисперсионных свойств волновода. Свойства уединенных волн деформации хорошо исследованы экспериментально, в частно-

сти, показано anomalously слабое затухание таких волн в полимерах [18].

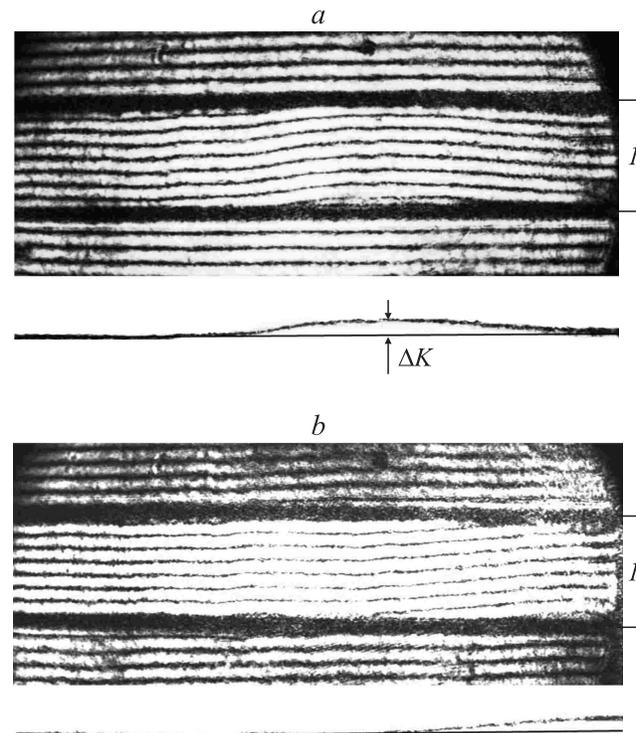


Рис. 2. Голографическая интерферограмма объемного солитона деформации в однородном цельном бруске на расстоянии 70–120 мм от входного торца. На сноске под интерферограммой приведен ход одной интерференционной полосы. Брусок обозначен цифрой 1. ΔK — максимальный сдвиг интерференционной полосы, из которого рассчитывалась амплитуда солитона (см. [18]).

Амплитуды возмущений (в долях интерференционной полосы) и расстояния между ними в двух- и трехслойных стержнях, склеенных клеем РСР, а также в двухслойном полностью расклеенном стержне

Волновод		Область наблюдения (расстояние от начала слоистой части), mm					
		20–70			70–120		
		амплитуда возмущений, ΔK			амплитуда возмущений, ΔK		
		1	2	3	1	2	3
I	Двухслойный, полностью склеенный РСР	0.9	0.5	0.2	0.5	0.3	–
		Расстояние 1–2: 30 mm Расстояние 2–3: 23 mm			Расстояние 1–2: 29 mm		
II	Трехслойный, полностью склеенный РСР	0.9	0.5	0.2	0.6	0.3	0.1
		Расстояние 1–2: 29.5 mm Расстояние 2–3: 21 mm			Расстояние 1–2: 29 mm		
III	Двухслойный, полностью расклеенный	0.1	0.15	–	1.0	0.1	–
		Расстояние 1–2: 31 mm			Расстояние 1–2: 34 mm		

На рис. 2 представлены две последовательно зарегистрированные волновые картины в однородном цельном бруске из ПММА. Видно, что в этом случае образуется только один солитон, за ним не следует каких-либо возмущений.

Как было экспериментально установлено в [17], солитон деформации в двухслойном упругом волноводе из ПММА, склеенном стеклоподобным этилцианоакрилатным клеем (СА), при попадании в область деляминации расщепляется на два солитона. В каждом из слоев второй солитон со временем отстает от первого вследствие разности скоростей (тогда как при генерации резонансного излучения последнее должно распространяться со скоростью, примерно равной скорости солитона, хотя затухание такого связанного состояния „солитон плюс рябь“ и происходит быстрее).

На рис. 3 представлены последовательные волновые картины в волноводе с продольным распилом (важно полное отсутствие контакта между слоями в слоистой части волновода). Отметим, что после расщепления слоев (как в случае деляминации, так и в данном случае при переходе солитона из однородной части в два разделенных слоя) не происходит формирования резонансного излучения за солитоном (см. рис. 4) — за солитоном образуется **только одно** вторичное возмущение, которое со временем отстает от первого (см. таблицу).

На рис. 4,5 представлены результаты наблюдения излучающего солитона продольной деформации в нелинейно-упругих двух- и трехслойном стержнях из ПММА, склеенных резиноподобным клеем РСР. Такие соединения могут моделироваться с помощью цепочек диполей с мягким связующим слоем [14].

В таблице приведены измеренные амплитуды возмущений и расстояния между максимумами первого солитона и второго возмущения при расщеплении солитона на цуг в случае деляминации (рис. 3) и при

образовании излучающего солитона (рис. 4,5) в двух последовательных областях регистрации (представлены интервалы 20–70 и 70–120 mm от начала слоистой части волновода).

Сравнение этих данных показывает, что в отличие от случая формирования цуга солитона при деляминации

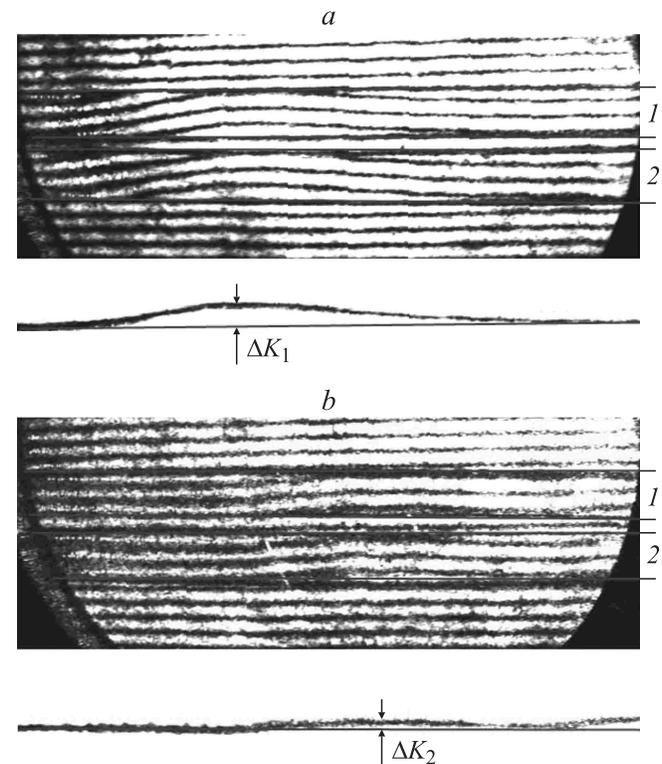


Рис. 3. Цуг из двух солитонов в бруске с продольным распилом в два последовательных момента времени. Слои волновода обозначены цифрами 1 и 2.

(III) расстояние между ведущим солитоном и длинно-волновым излучением (I,II) не увеличивается со временем. Это позволяет считать, что на рис. 4, 5 наблюдается нетривиальная длинная волна продольной деформации — излучающий солитон. Причинами, вызывающими генерацию излучения, в нашем случае служат мягкий клеевой слой и разная толщина слоев. Отсутствие клея или замена его на жесткий стеклоподобный клей (СА) приводят к выравниванию полей деформации в слоях и отсутствию излучения, связанного с солитоном деформации [17]. Обычная линейная радиация, если бы она возникла, с одной стороны, отстала бы от солитона в силу разности скоростей, а с другой — быстро затухла (особенно в полимерах) и вследствие большого декремента затухания для ПММА не могла бы быть зарегистрирована на расстояниях, превышающих 4–5 характерных значений толщины волновода (40–50 мм в нашем случае).

Таким образом, можно утверждать, что экспериментально подтверждено возникновение и распространение длинной нелинейной упругой волны — излучающего солитона деформации, что может быть полезно для понимания наличия излучения в экспериментах с необычными субмикросекундными акустическими солитонами в тонких слоях [11] и использовано в задачах неразру-

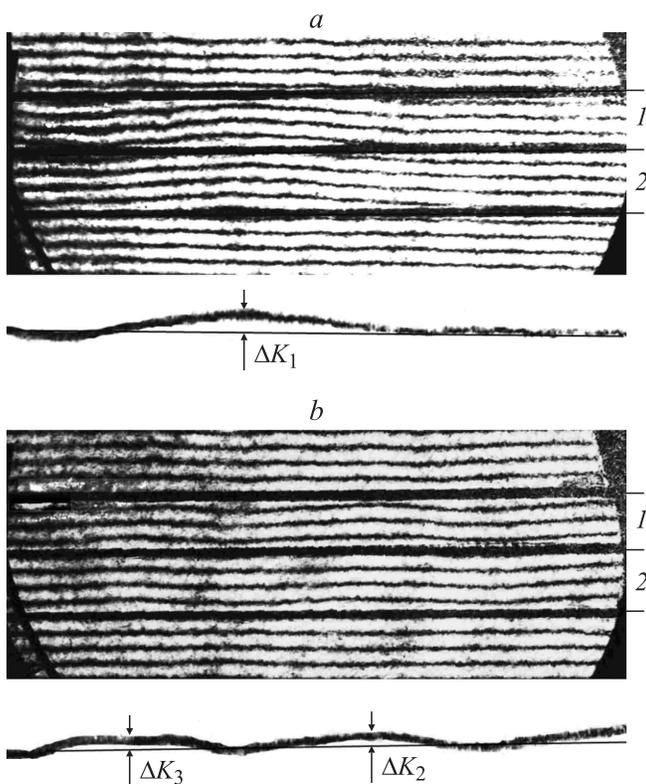


Рис. 4. Волновые картины в двухслойном бруске, склеенном клеем РСР, в два последовательных момента времени (*a, b*). Слои волновода обозначены цифрами 1, 2. Вертикальный масштаб на сносках под интерферограммами увеличен в 2 раза.

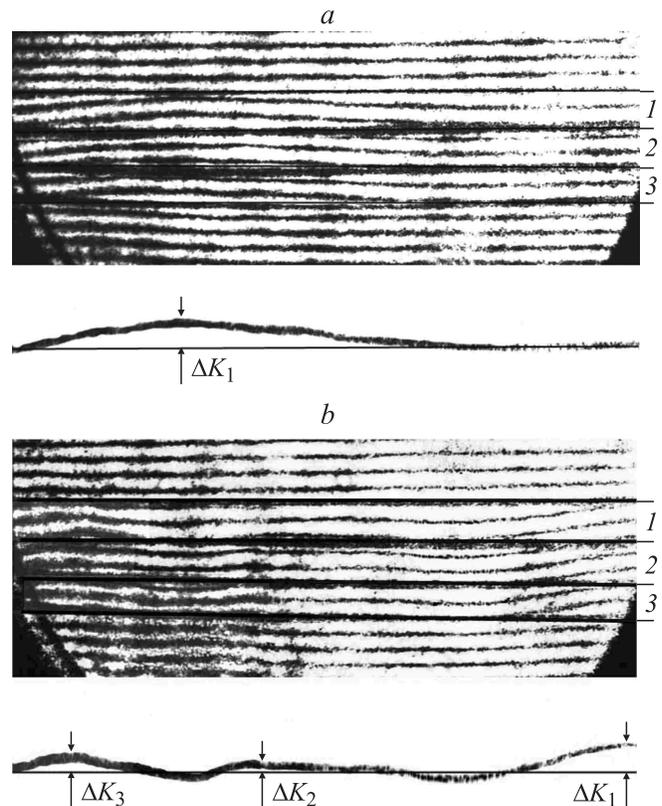


Рис. 5. Волновые картины в трехслойном бруске, склеенном клеем РСР, в два последовательных момента времени (*a, b*). Слои волновода обозначены цифрами 1–3. Вертикальный масштаб на сносках под интерферограммами увеличен в 2 раза.

шающего контроля внутренней структуры протяженных твердотельных волноводов.

Список литературы

- [1] Hunter J.K., Vanden Broeck, J.-M. // J. Fluid Mech. 1982. Vol. 134. P. 205.
- [2] Vanden Broeck J.-M. // Phys. Fluids. 1991. Vol. A3. P. 2659.
- [3] Karpman V.I. // Phys. Rev. E. 1993. Vol. 47. P. 2073.
- [4] Karpman V.I. // Phys. Lett. A. 1994. Vol. 186. N 4. P. 303.
- [5] Karpman V.I., Rasmussen J.J., Shagalov A.G. // Phys. Rev. E. 2001. Vol. 64. N 2. P. 026 614.
- [6] Ostrovsky L.A., Stepanyants Yu.A. // Chaos. 2005. Vol. 15. P. 037 111.
- [7] Boyd J.P. Weakly Nonlinear Solitary Waves and Beyond-All-Orders Asymptotics. Boston: Kluwer, 1998.
- [8] Voronovich V.V., Sazonov I.A., Shrira V.I. // J. Fluid Mech. 2006. Vol. 568. P. 273.
- [9] Espinosa-Cerón A., Fujioka J., Gómez-Rodríguez A. // Phys. Scr. 2003. Vol. 67. P. 314.
- [10] Pomeau Y., Ramani A., Grammaticos B. // Physica D. 1988. Vol. 31. P. 127.
- [11] Peronne E., Perrin B. // Ultrasonics. 2006. Vol. 44. P. 1203.
- [12] Yagi D., Kawahara T. // Wave Motion. 2001. Vol. 34. P. 97.

- [13] *Fochesato C., Dias F., Grimshaw R.* // *Physica D.* 2005. Vol. 210. P. 96.
- [14] *Khusnutdinova K.R., Samsonov A.M., Zakharov A.S.* // *Phys. Rev. E.* 2009. Vol. 79. N 5. P. 056 606.
- [15] *Samsonov A.M.* Strain solitons in solids and how to construct them. Chapman and Hall/CRC Press, 2001.
- [16] *Khusnutdinova K.R., Samsonov A.M.* // *Phys. Rev. E.* 2008. Vol. 77. N 6. P. 066 603.
- [17] *Dreiden G.V., Khusnutdinova K.R., Samsonov A.M., Semenova I.V.* // *J. Appl. Phys.* 2010. Vol. 107. N 3. P. 034 909.
- [18] *Дрейден Г.В., Самсонов А.М., Семенова И.В.* // *ЖТФ.* 2008. Т. 78. Вып. 5. С. 8.