

ных пиков для них. Эти распределения приведены на рисунке в виде сплошных и пунктирных линий. Сплошные кривые рассчитаны в рамках стандартной модели низкотемпературных стекол, без учета вклада НЧМ. Пунктирные кривые представляют собой эти же распределения, но сдвинутые в сторону увеличения значений ширины так, чтобы получить наилучшее согласие с экспериментальными данными. Предполагалось, что вклад НЧМ в уширение линий одинаков для всех спектров и что при $T = 2$ К этим вкладом можно пренебречь. Тогда значения введенного сдвига и будут определять величину вклада НЧМ в уширение линий при данной температуре. Оцененным таким образом величины вклада НЧМ, $\Gamma_{\text{НЧМ}}$, составили: $\Gamma_{\text{НЧМ}} \cong 0,04$ ГГц при $T = 4,5$ К и $\Gamma_{\text{НЧМ}} \cong 0,24$ ГГц при $T = 7$ К.

Автор выражает благодарность А.В. Наумову, а также L. Kador, M. Bauer и E. Barkai, принимавшим участие в данной работе. Работа поддержана грантами фондов Volkswagen-Stiftung и Deutsche Forschungsgemeinschaft. Автор благодарит также Российский фонд фундаментальных исследований (гранты 01-02-16481 и 02-02-16739) за финансовую поддержку данной работы.

Список литературы

1. Moerner W E, Kador L *Phys. Rev. Lett.* **62** 2535 (1989)
2. Orrit M, Bernard J *Phys. Rev. Lett.* **65** 2716 (1990)
3. Вайнер Ю Г и др. *Оптика и спектроскоп.* **94** 926 (2003)
4. Вайнер Ю Г и др. *Оптика и спектроскоп.* **94** 936 (2003)
5. Naumov A V et al. *Phys. Rev. B* **63** 212302 (2001)
6. Barkai E et al. *J. Lumin.* **107** 21 (2004)
7. Barkai E, Silbey R, Zumofen G *Phys. Rev. Lett.* **84** 5339 (2000)
8. Feller W *An Introduction to Probability Theory and Its Applications* Vol. 2 (New York: Wiley, 1970)
9. Barkai E et al. *Phys. Rev. Lett.* **91** 075502 (2003)
10. Naumov A V et al. *J. Chem. Phys.* **119** 6296 (2003)
11. Naumov A V et al. *J. Lumin.* **107** 287 (2004)

PACS numbers: 41.20.Jb, 42.65. – k

Отрицательное преломление в оптическом диапазоне и нелинейное распространение волн

В.М. Агранович

Более 30 лет назад В. Веселаго обратил внимание на то, что в изотропной среде, обладающей отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей $\epsilon < 0$, $\mu < 0$, распространение электромагнитных волн характеризуется весьма необычными свойствами. Поскольку в таких средах волновой вектор \mathbf{K} , электрическое поле \mathbf{E} и магнитное поле \mathbf{H} образуют в волне левую тройку векторов в противоположность правой тройке векторов, которая имеет место в обычных средах, такого рода материалы в англоязычной литературе часто называются *left-handed materials* (LHM) в отличие от обычных материалов, которые называются *right-handed materials* (RHM). Среди многих необычных свойств распространения волн в подобных средах интересным является тот факт, что в них направления волнового вектора \mathbf{K} и вектора Пойнтинга \mathbf{S} антипараллельны. Кроме того, на границе RHM/LHM преломленный луч оказывается расположенным по ту же сторону от нормали к поверхности, что и луч падающий (так называемое отрицатель-

ное преломление), так что часто LHM также называют материалами с отрицательной рефракцией (negative refraction materials, NRM).

Предсказание В. Веселаго в последние годы вызвало значительный теоретический интерес и стимулировало интенсивные экспериментальные исследования с целью создать такого рода новые LHM (или NRM) материалы [1–12]. Экспериментальный успех был достигнут для области микроволн [3, 6, 7]. В дальнейшем, однако, было замечено, что фотонные кристаллы также могут обладать отрицательной рефракцией. Аналогично блоховским волнам электронов в кристаллах, оптические волны в периодической решетке фотонных материалов могут иметь состояния, в которых направление волнового вектора и направление групповой скорости противоположны [8–12]. Отрицательное преломление света на поверхности фотонного кристалла было продемонстрировано во многих численных экспериментах [10–12].

Основное внимание при изучении LHM или NRM до настоящего времени было посвящено исследованию линейных оптических эффектов. В докладе мы обсуждаем нелинейные оптические процессы и показываем, что они также оказываются весьма необычными. Мы ограничиваемся рассмотрением однородных NRM и не рассматриваем фотонные материалы. Анализ нелинейных оптических процессов в таких материалах является более сложным, поскольку в этих материалах необходимо принимать во внимание наличие оптических процессов переброса (optical Umklapp processes).

Прежде чем начать обсуждение нелинейных оптических эффектов в NRM, следует отметить, что обычно используются два различных подхода при исследовании распространения волн.

В первом из них, который обычно применяется при обсуждении свойств электродинамики LHM, используются уравнения Максвелла для электрических и магнитных полей \mathbf{E} , \mathbf{H} и векторов индукции \mathbf{B} и \mathbf{D} (так называемая \mathbf{E} -, \mathbf{H} -, \mathbf{B} -, \mathbf{D} -картина). Известно, однако, что такой подход оправдан только для области микроволн, так как для области высоких частот плотность магнитной дипольной поляризации \mathbf{M} теряет свое обычное физическое значение [13]. В более общем подходе используется \mathbf{E} -, \mathbf{B} -, \mathbf{D} -картина, в которой $\mathbf{B} = \mathbf{H} \mathbf{c} \mu = 1$ и $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$, где диэлектрическая проницаемость ϵ содержит в себе весь линейный отклик. При таком рассмотрении диэлектрический тензор $\epsilon(\omega, \mathbf{k})$ обладает не только частотной, но и пространственной дисперсией. Легко убедиться в том, что оба подхода для области микроволн, где введение магнитной проницаемости μ оправдано, приводит к тождественным результатам. Однако использование \mathbf{E} -, \mathbf{B} -, \mathbf{D} -картины [14] позволяет проследить возникновение LHM при учете не только магнитно-дипольной, но также и диэлектрической квадрупольной поляризации, и, кроме того, позволяет последовательно перейти в область волн оптического диапазона. При таком рассмотрении векторы \mathbf{E} , \mathbf{B} и \mathbf{K} образуют правую тройку векторов в любых средах, и единственным нетривиальным свойством так называемых LHM, постулированных в работах В. Веселаго, является отрицательная групповая скорость волн, так что отрицательная рефракция волны является естественным следствием ее отрицательной групповой скорости [15, 16]. Мы не обнаружили никаких принципиальных ограничений, которые препятствовали бы возникновению отрицатель-

