

УДК 621.373 : 535

НЕЛИНЕЙНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ И ГЕНЕРАЦИЯ ГАРМОНИК В СРЕДАХ С НОРМАЛЬНОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

Ганеев Р. А., Горбушин В. В., Кулагин И. А., Усманов Т.

Экспериментально и теоретически показано, что вследствие нелинейного изменения показателя преломления открываются новые спектральные диапазоны, в которых возможна эффективная генерация оптических гармоник. Исследуются зависимости эффективности генерации третьей гармоники от плотности мощности основного излучения и концентрации нелинейных газообразных сред с нормальной дисперсией. Обсуждаются возможности использования для диагностики вещества необычной для процесса генерации третьей гармоники зависимости эффективности преобразования от плотности мощности ($\eta \sim W^4$).

В настоящее время наиболее эффективным методом получения когерентного коротковолнового излучения является генерация гармоник и сложение частот в газах. Для достижения эффективной генерации гармоник при фокусировке лазерного излучения в центр нелинейной среды требуется использование сред с аномальной дисперсией [1, 2]. Последнее существенно ограничивает область получения когерентного излучения в коротковолновом диапазоне, так как нелинейные среды в значительной части данного диапазона обладают нормальной дисперсией [3].

В данной работе впервые экспериментально демонстрируется возможность эффективной генерации третьей гармоники (ГТГ) при фокусировке лазерного излучения в газы с нормальной дисперсией, что теоретически обосновывается нелинейным изменением показателя преломления, зависящим от интенсивности излучения, т. е. эффектом Керра. На основе этого эффекта показана возможность создания источников когерентного излучения в новых диапазонах вакуумного ультрафиолета (ВУФ) и мягкого рентгена.

Схема экспериментальной установки аналогична [4], за исключением того, что в качестве активных элементов в лазерной установке были использованы элементы на фосфатном стекле, активированном неодимом. Излучение с длиной волны $\lambda_1 = 1055.1$ нм преобразовывалось в кристалле-удвоителе и кристалле-смесителе в третью гармонику. Полученное излучение с $\lambda_2 = 351.7$ нм фокусировалось кварцевой линзой в кювету с газом. В качестве нелинейной среды использовались инертные газы Кг и Хе, которые в исследуемом диапазоне спектра ($\lambda_3 = 117.2$ нм) обладают нормальной дисперсией для процесса ГТГ. Кювета с выходным окном из LiF присоединялась к вакуумному монохроматору ВМР-2. Генерируемое в кювете ВУФ излучение регистрировалось каналовым электронным умножителем ВЭУ-6. Максимальная энергия накачки с $\lambda_2 = 351.7$ нм была 0.5 мДж, длительность импульса 5 пс, полуширина спектра излучения 10^{-1} нм. Пространственное распределение излучения накачки было близко к гауссову.

Исследовались зависимости эффективности преобразования от плотности мощности накачки W и давления газа p . Зависимость эффективности преобразования от плотности мощности основного излучения при давлении криптона 11 Тор показана на рисунке, а. Каждая точка, представленная на рисунке, — усреднение по 20 экспериментальным результатам. Зависимость эффективности преобразования от плотности мощности близка к виду $\eta \sim W^4$.

Полученная зависимость η (W), необычная для процесса ГТГ, теоретически объясняется на основе аналитического решения [5]. Эффективность процесса преобразования гауссовых пучков в условиях сильной фокусировки в центр нелинейной среды определяется фазовым интегралом, имеющим следующий вид:

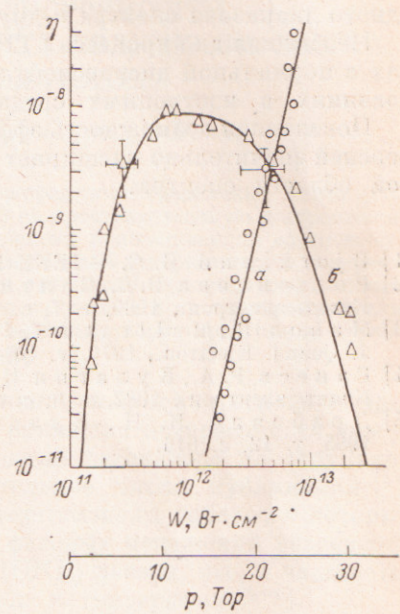
$$I = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp \{i [ax + 2(a\rho - 1) \operatorname{arc} \operatorname{tg} x]\}}{1 + x^2} dx. \quad (1)$$

Здесь $\alpha = \frac{3\pi\omega}{c} bN\Delta\chi^{(1)}$; $\rho = \frac{\pi\Delta\chi_k^{(3)}}{cn_1n_3\Delta\chi^{(1)}} \Phi \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right)$; b — конфокальный параметр; ω — частота основного излучения; $\Phi = \frac{n_1c}{8\pi} |E|^2$ — интенсивность основного излучения; E — амплитуда; N — плотность среды; r_0 — радиус пучка в перетяжке; r — полярная поперечная координата; n_1 и n_3 — показатели преломления на основной и генерируемой частотах; $\Delta\chi^{(1)}$ — разность линейных восприимчивостей на основной и генерируемой частотах; $\Delta\chi_k^{(3)} = \frac{n_3}{n_1} \chi^{(3)}(\omega; \omega, \omega, -\omega) - \chi^{(3)}(3\omega; 3\omega, \omega, -\omega)$ — разность нелинейных восприимчивостей третьего порядка, ответственных за эффект Керра.

В случае сред с нормальной дисперсией ($\alpha < 0$) коэффициент преобразования интенсивности основного излучения в третью гармонику определяется выражением

$$\eta = \left\{ \frac{2\pi\gamma(a\rho)^2}{\Gamma(1+a\rho)} \frac{e^\alpha}{1-a\rho} [a(2+\rho)\Psi(1-a\rho, 1; -2a) + \Psi(-a\rho, 1; -2a)] \right\}^2. \quad (2)$$

Зависимость эффективности ГТГ в Кг от плотности мощности основного излучения (а) и давления газа в кювете при $W=6 \cdot 10^{12}$ Вт/см² (б).



Здесь $\gamma = \chi^{(3)}(3\omega)/\Delta\chi_k^{(3)}$; $\chi^{(3)}(3\omega)$ — нелинейная восприимчивость, ответственная за ГТГ; $\Gamma(x)$ — гамма-функция; $\Psi(a, b; x)$ — вырожденная гипергеометрическая функция.

Коэффициент преобразования плотности мощности определяется интегрированием (2) по поперечным координатам и времени.

Как можно показать из (1), в сфокусированных пучках влияние фазового сдвига, вызванного эффектом Керра, подобно влиянию фазовой добавки, обусловленной фокусировкой. Изменение пространственных характеристик сфокусированного пучка в результате изменения оптических свойств среды, вызванного эффектом Керра, и приводит к возможности ГТГ в средах с нормальной дисперсией.

Из (2) следует, что при $|\rho| \ll 1$ коэффициент преобразования пропорционален четвертой степени интенсивности излучения накачки.

Экспериментальные и теоретические исследования показали, что для импульсов пикосекундной длительности использование данного диапазона плотности мощности накачки не приводит к оптическому пробое нелинейной среды. Так как насыщения процесса преобразования не наблюдалось, то существенного роста эффективности можно достигнуть увеличением плотности мощности основного излучения.

Доказательством того, что данный процесс обусловлен эффектом Керра, служит также зависимость эффективности преобразования от давления газа. С ростом давления, с одной стороны, увеличивается фазовая расстройка, ведущая к снижению эффективности преобразования, с другой стороны, возрастает влияние эффекта Керра. Вследствие этого в указанной зависимости должен

иметь место оптимум, что и наблюдалось экспериментально (см. рисунок, б).

Аналогичные результаты были получены в Хе, где максимальная эффективность преобразования была в 5 раз меньше, чем в криптоне.

Следует отметить тот факт, что при ГТГ в газах с аномальной дисперсией эффект Керра является основным фактором, ограничивающим эффективность преобразования [3, 4], тогда как в данном случае процесс ГТГ обусловлен этим эффектом.

Описанный здесь эффект не наблюдается при малых интенсивностях, когда влияние эффекта Керра ничтожно. Этот факт находится в согласии с теоретическими представлениями, развитыми в [1, 2]. При больших интенсивностях излучения накачки появляется возможность управлять соотношением между показателями преломления среды на частотах основного излучения и гармоники. Это ведет к созданию условий для синхронного преобразования излучения из одного диапазона спектра в другой.

Необычная для процесса ГТГ зависимость $\eta(W)$, которая наблюдалась в средах с нормальной дисперсией, может служить при спектроскопических исследованиях в изотропных средах.

Показанная возможность эффективной генерации в средах с нормальной дисперсией значительно расширяет диапазон перестройки частоты в коротковолновой области спектра.

Литература

- [1] Bjorklund G. C. — IEEE J. Quant. Electron., 1975, v. QE-11, p. 287.
- [2] Ростовцева В. В., Салтвел С. М., Сухоруков А. П., Тункин В. Г. — Квант. электрон., 1980, т. 7, с. 1081.
- [3] Mahon R., McIlrath T. J., Myerscough V. R., Коорман D. — IEEE J. Quant. Electron., 1979, v. QE-15, p. 444.
- [4] Ганеев Р. А., Кулагин И. А., Усманов Т., Худайберганов С. Т. — Квант. электрон., 1982, т. 9, с. 2508.
- [5] Драбович К. Н., Кулагин И. А., Усманов Т. — Квант. электрон., 1985, т. 12, с. 616.

Поступило в Редакцию 16 апреля 1986 г.