

ДИФРАКЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ОДНОПЕРИОДНОГО ЦУГА ПОЛЯ НА ЩЕЛИ

© 2010 г. С. А. Козлов, доктор физ.-мат. наук; Д. В. Иванов

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: kozlov@mail.ifmo.ru

Представлены результаты численного моделирования дифракции двумерной ТЕ-поляризованной терагерцовой волны, содержащей лишь одно полное колебание поля, на щели, размер которой составляет десять центральных длин волн излучения. Показано, что при дифракции такого широкополосного терагерцового излучения может происходить модуляция его спектра, по форме близкая к наблюдаемой при прохождении излучения в резонансно поглощающей среде.

Ключевые слова: терагерцовая спектроскопия, терагерцовый однопериодный цуг, непараксиальное излучение, дифракция Френеля.

Коды OCIS: 260.0260

Поступила в редакцию 14.05.2010

В настоящее время известно большое количество работ, посвященных терагерцовой спектроскопии, позволяющей регистрировать спектры в диапазоне частот 0,2–2 ТГц (см., например, обзор в монографии [1]). Терагерцовый диапазон спектроскопии интересен тем, что в нем лежат линии поглощения как простых, так и сложных молекул, соответствующие вращательным колебаниям молекулы, межмолекулярному взаимодействию и колебаниям молекулярных комплексов, образующихся за счет ван-дер-ваальсовых и водородных связей [2]. В настоящей работе показано, что при расшифровке спектрограмм в определенных ситуациях необходимо учитывать эффекты, связанные с дифракцией терагерцового излучения на апертуре оптической системы. В проходящем излучении “резонансы”, наблюдаемые в терагерцовой спектроскопии, могут оказаться дифракционной природы.

Терагерцовое излучение, которое используется в спектроскопии, в силу особенностей его наиболее эффективных источников обычно представляет собой волновой пакет лишь из одного полного колебания – однопериодного цуга оптического поля, поперечные размеры которого могут составлять менее десятка центральных длин волн излучения [1, 2]. При анализе особенностей дифракции такого непараксиального терагерцового излучения из малого числа колебаний в настоящей статье ограничимся рассмотрением двумерных ТЕ-поляризованных волн.

Распределение поля E на щели (или на облучаемом фемтосекундным импульсом полупроводниковом источнике терагерцового излучения) будем полагать имеющим квазипрямоугольный вид [1, 3]

$$E(x, t) = -4 \frac{t}{\Delta t} E_0 \exp\left(-2 \frac{x^{16}}{\Delta x^{16}}\right) \exp\left(-2 \frac{t^2}{\Delta t^2}\right), \quad (1)$$

где E_0 – максимальная амплитуда поля на щели, x – поперечная координата оптического пучка, t – время, Δx и Δt – пространственная и временная характеристики волнового пакета.

При рассмотрении непараксиальной дифракции однопериодного цуга со сверхшироким временным спектром удобно анализировать динамику его пространственно-временного спектра

$$g(z, k_x, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(z, x, t) \exp[-i(k_x x + \omega t)] dx dt, \quad (2)$$

где z – координата оси, вдоль которой распространяется излучение, k_x и ω – пространственная и временная частоты цуга. Эта динамика описывается выражением [4]

$$g(z, k_x, \omega) = C(k_x, \omega) \exp\left(-i\sqrt{k^2 - k_x^2} z\right), \quad (3)$$

где $C(k_x, \omega)$ – пространственно-временной спектр излучения в плоскости щели (при $z = 0$).

На рис. 1 проиллюстрированы нормированные на свои максимальные значения E_0 и G_{\max} временные спектры G (б–г) однопериодного цуга с $\Delta x = 10\lambda_0$, $\lambda_0 = 300$ мкм, $\Delta t = 0,3$ пс на оси симметрии светового пучка (при $x = 0$) в плоскости щели (а, б) и на различных расстояниях от нее (в, г). Дисперсия показателя преломления учитывалась соотношением [5]

$$n(\lambda) = 1 + 64,328 \times 10^{-6} + \frac{29498,1 \times 10^{-6}}{146 - \lambda^2} + \frac{255,4 \times 10^{-6}}{41 - \lambda^2}, \quad (4)$$

где длина волны λ (мкм) практически не влияла на дифракцию излучения.

Из рисунка видно, что по мере распространения цуга для различных компонент его временного спектра щель будет видна как разное число зон Френеля, что приводит к увеличению или ослаблению значения спектральной плотности на различных длинах волн (модуляция спектра). Провалы в спектре близки по форме к типичным линиям поглощения (см., например, [3]), но, разумеется, не являются ими. Это важно учитывать при расшифровке спектрограмм, полученных на конкретных спектрографах.

Специфическим для непараксиального излучения является малость расстояния от выходной апертуры оптической системы, на котором уже достаточно сильно проявляются эффекты, обу-

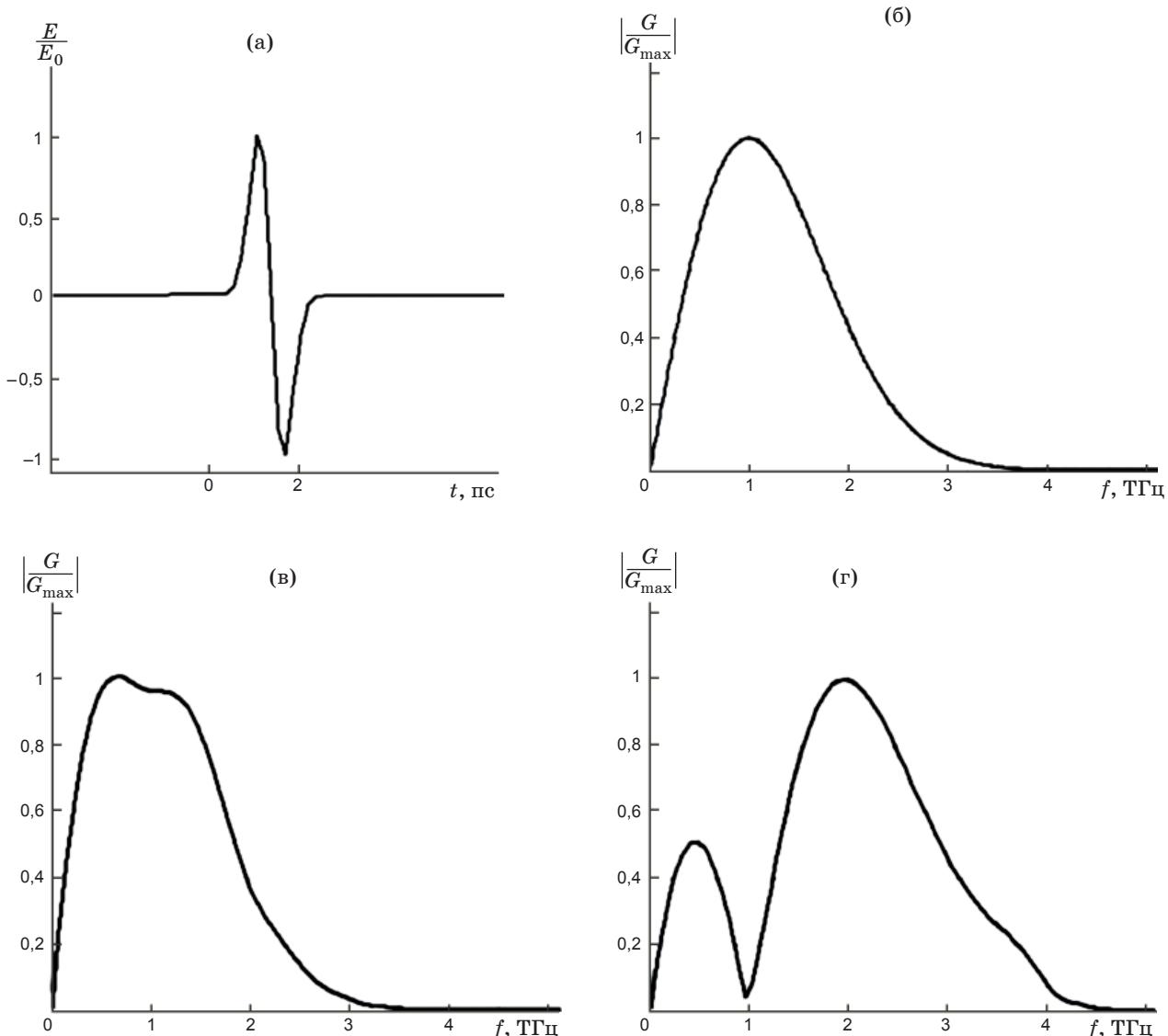


Рис. 1. Электрическое поле E (а) и спектры G (б, в, г) импульса терагерцового излучения в плоскости щели (б) и на разных расстояниях от нее в воздухе (в – 3,6 мм, г – 7,4 мм).

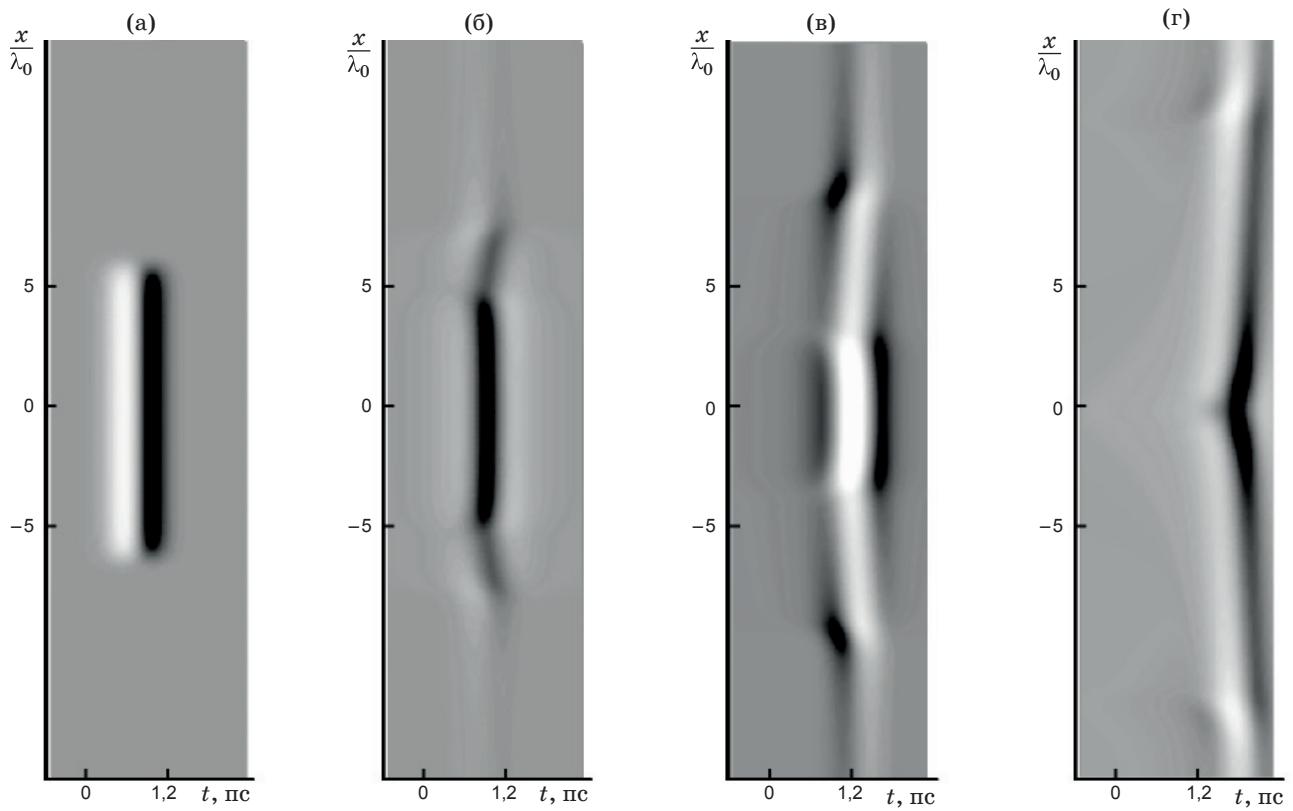


Рис. 2. Изменение электрического поля терагерцового волнового пакета с изменением пройденного им расстояния в среде (0 мм – а, 1,6 мм – б, 3,6 мм – в, 7,4 мм – г).

словленные дифракцией Френеля. Для излучения с рассмотренными поперечными размерами она составляет величину порядка нескольких миллиметров.

На рис. 2 представлены изображения поля цуга, продифрагированного на щели. Темным участкам соответствуют минимальные значения амплитуды, светлым – максимальные. На рисунке видны характерные дифракционные искривления волнового фронта.

Таким образом, в настоящей работе показано, что по мере распространения непараксиального терагерцового однопериодного цуга, продифрагированного на щели, для различных его спектральных компонент щель будет видна как разное число зон Френеля, что приводит к модуляции спектра. Наблюдаемые провалы в спектре близки по форме к типичным линиям поглощения. Следовательно, при расшифровке спектрограмм, полученных на конкретных спектрографах, важно учитывать влияние диф-

ракции излучения на выходной апертуре оптической системы.

Работа частично поддержана грантами НШ-5707.2010.2, РНП.2.1.1.4923 и РФФИ № 08-02-00902.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lee Y.-S. Principles of Terahertz Science and Technology. Corvalis: Springer Science+Business Media, 2009. 347 p.
2. Greene B.I., Saeta P.N., Douglas R.D., Schmitt-Rink S., Chuang S.L. Far-infrared light generation at semiconductor surfaces and its spectroscopic applications // IEEE J. Quant. Electron. 1992. V. 28. № 10. P. 2302–2312.
3. Zhang X.-C., Xu J. Introduction to THz wave photonics. N.Y.: Springer Science+Business Media, 2009. 249 p.
4. Козлов С.А., Самарцев В.В. Оптика фемтосекундных лазеров. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. 218 с.
5. Физические величины. Справочник. М.: Энергатомиздат, 1991. 1232 с.