

УДК 536.21.33

## РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКОЙ МЕТОДИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ СОЛИТОНОПОДОБНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

С. Д. Зотов, Б. Г. Макеев, Е. М. Кудрявцев, Э. Н. Лоткова

*Разработана методика, позволяющая наблюдать процесс теплопереноса в образце твердого тела после воздействия лазерного импульса по изменению температуры на поверхности образца. Для регистрации повышения температуры использовался пироэлектрический приемник теплового излучения МГ-30, включенный в схему синхронного демодулирования. Методика будет использована для исследования обнаруженных в ФИАНе так называемых волн изменения отражения и проводимости (ВИОП). Эти волны можно считать проявлением солитонного механизма переноса тепла в твердых телах.*

В 1992 году в работах, проводимых в ФИАНе, были экспериментально обнаружены так называемые волны изменения отражения и проводимости (ВИОП) (см. [1]). Они имеют некоторые признаки солитонной волны – постоянство знака амплитуды и величины скорости, которые не изменяются и при отражении от поверхности образца. Порог возникновения ВИОП – порядка  $10 \text{ кВт/см}^2$ .

В [1] отмечено, что ВИОП может быть проявлением солитонного механизма переноса тепла в твердых телах. Одним из способов подтверждения существования солитонной составляющей теплопереноса являлись предварительные опыты с использованием тепловизионной камеры [2] для наблюдения за изменением температуры "тыльной" стороны плоского образца, передняя сторона которого облучалась импульсом ИК лазера. Недавно было показано, что ВИОП возникает также в массивном медном образце при облучении его мощным электронным пучком [3]. Это облучение приводило к быстрому

нагреву образца, в процессе которого солитонная составляющая теплопереноса регистрировалась с помощью термопары.

В настоящей работе для сравнения с экспериментом [2] изменение температуры со временем  $T(t)$  находилось из решения уравнения теплопроводности для условий, соответствующих опытам по облучению образцов плексигласа разной толщины [2]:

$$T(X, t) = \int_0^t \frac{2Q(t')dt'}{c\rho[4\pi a(t-t')]^{3/2}} e^{-\frac{x^2}{4a(t-t')}} \quad (1)$$

где  $Q(t)$  – функция изменения интенсивности источника во времени,  $X$  – толщина образца,  $\rho$  – плотность материала,  $c$  – теплоемкость,  $a$  – коэффициент температуропроводности материала.

Расчетные данные относительно времени достижения максимума  $T(t)$  удовлетворительно согласуются с экспериментальными [2].

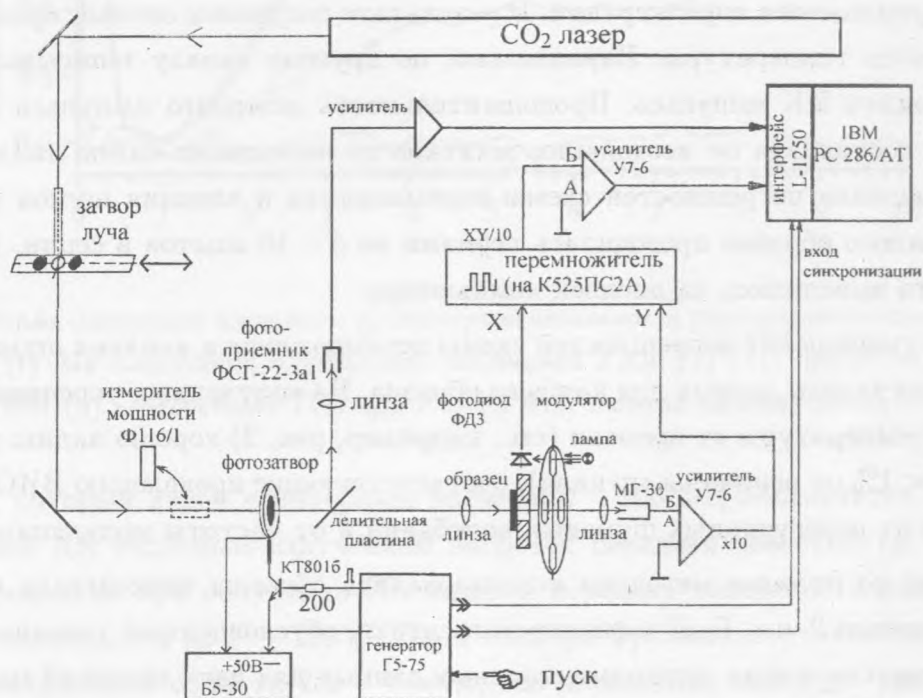


Рис. 1. Схема установки.

С целью дальнейшего развития оптической методики и упрощения обработки результатов (которая представляет проблему в случае применения тепловизионной каме-

ры) была создана схема экспериментального исследования на базе пироэлектрического приемника теплового излучения МГ-30, включенного в схему синхронного демодулирования, см. рис. 1.

Для облучения использовался электроразрядный  $CO_2$  лазер непрерывного действия, работающий в спектральной области 10.6 мкм. Лазерный импульс получали с помощью фотозатвора, управляемого генератором импульсов точной амплитуды Г5-75. Для фокусировки лазерного пучка на поверхности и регулировки его размера на ней, а также плотности потока излучения, перед образцом помещалась линза из  $NaCl$  с фокусным расстоянием  $f = 57$  см. За образцом перед приемником устанавливались модулятор и дополнительная линза с  $f = 10$  мм, чтобы получить сфокусированное на окошко приемника тепловое излучение от образца, модулированное на определенной частоте, для последующего синхронного демодулирования сигнала от приемника. Сигнал опорной частоты получался от дополнительного фотоприемника, облучаемого лампой через тот же модулятор. Опорный сигнал и синхронно модулированный сигнал от МГ-30, поступали на схему перемножения и фильтрации. В результате получался сигнал, пропорциональный изменению температуры. Параллельно, по другому каналу записывалась форма воздействующего ИК импульса. Продолжительность лазерного импульса в этих экспериментах составляла от нескольких десятков до нескольких сотен миллисекунд. С целью уменьшения погрешностей схемы перемножения и влияния шумов запись данных для каждого образца проводилась сериями по 5 – 10 опытов в серии. Все данные эксперимента выводились на дисплей компьютера.

С целью уменьшения погрешностей схемы перемножения и влияния шумов проводилась серийная запись данных для каждого образца. На полученных усредненных осциллограммах температуры от времени (см., например, рис. 2) хорошо видны регулярные колебания ( $< 1\%$  от величины сигнала), соответствующие проявлению ВАОП, которые отличаются от нерегулярных шумовых колебаний и от частоты модуляции в схеме.

В опытах по отладке методики использовались образцы плексигласа в виде пластинок толщиной 2 мм. Был зафиксирован сигнал, обусловленный тепловым потоком. Запись соответствующих экспериментальных данных для двух значений мощности лазерного излучения 1.7 и 0.7 Вт приведена на рис. 2.

На рис. 2 кривая а – форма ИК лазерного импульса, б – сигналы, соответствующие изменению температуры на тыльной стороне на протяжении времени с момента начала лазерного импульса. Для сравнения на том же рисунке приводится кривая, рассчитанная по формуле (1) для мощности лазерного излучения  $P = 1.7$  Вт. Из сравнения

экспериментальной и расчетной кривых видно, что их формы  $T(t)$  почти одинаковы. Как видно из рис. 2, максимум повышения температуры в экспериментах наблюдается через  $\sim 5.5$  сек после начала импульса. Это значение  $t_m$  совпадает с рассчитанным (5.56 сек).

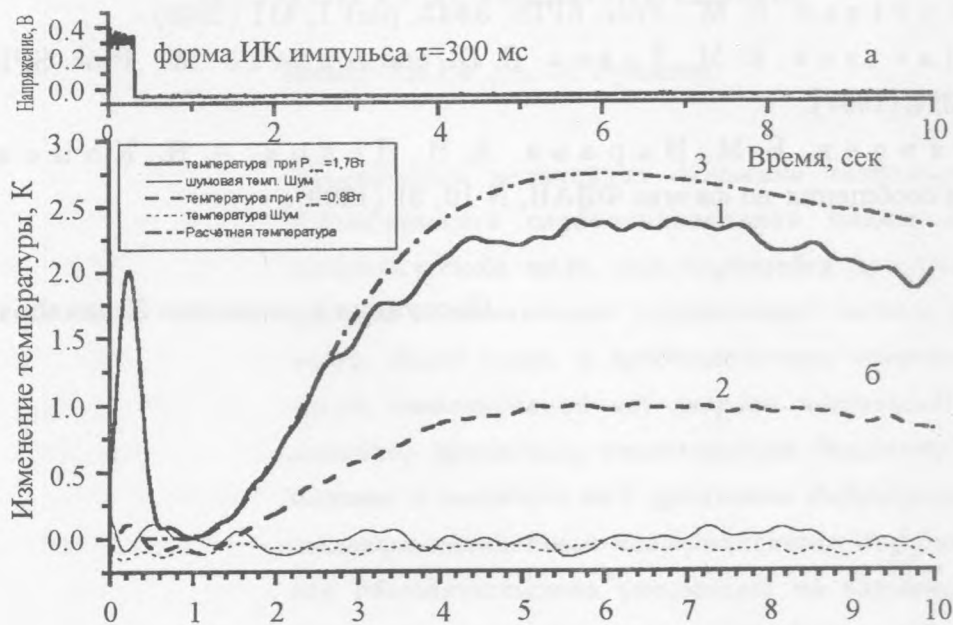


Рис. 2. а) форма лазерного импульса; б) экспериментальное и рассчитанное изменение температуры  $T(t)$  для пластинки плексигласа толщиной 2 мм; (1)  $T(t)$  при  $P = 1.7$  Вт, (2) – при  $P = 0.7$  Вт, (3) – расчетное  $T(t)$  при  $P = 1.7$  Вт; тонкие нижние линии – шумы.

Сигнал, который виден в интервале времени 0 – 300 мс, объясняется прошедшим через образец ИК тепловым излучением нагретой передней поверхности. По приближительным оценкам при облучении ИК лазером передняя поверхность плексигласовой пластинки нагревается до  $T \leq 150^\circ\text{C}$ . Этой температуре соответствует тепловое излучение в спектральной области 2.5 – 4 мкм, где плексиглас частично пропускает ИК излучение.

При тщательном анализе многочисленных записей сигналов изменений температуры в случае плексигласа на начальном участке развертки (1 – 4 сек) явно видны периодические изменения амплитуды сигнала, которые можно отнести за счет влияния волны изменения отражения и проводимости, возникшей в результате воздействия импульса

ИК излучения, движущейся со скоростью  $\sim 1$  см/сек, многократно отражающейся от лицевой и тыльной поверхности образца.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект N 97-02-17954).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kudriavtsev E. M. Proc. SPIE, **3343**, part 1, 411 (1998).
- [2] Kudriavtsev E. M., Zotov S. D., and Autric M. Proc. SPIE, **3244**, part. 1, 314 (1997).
- [3] Кудрявцев Е. М., Варава А. В., Дедов А. В., Комов А. Т. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 10, 31 (1999).

Поступила в редакцию 29 декабря 1999 г.