

Г. В. Польшиков, Е. И. Шевнина, Лам Шон Фам, Н. В. Шальгина

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЖИМА ТЕПЛООВОГО ХРАНЕНИЯ ТЕРМОУПРУГОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Проанализированы возможности использования в многоканальных фотометрических системах явления теплового хранения в приемниках излучения на основе термоупругого эффекта. Проведена оценка возможных источников погрешности измерения энергетических параметров лазерного излучения и рассмотрены методы их устранения.

*Ключевые слова:* термоупругий эффект, кристаллический кварц, тепловое поле.

Приемник излучения на основе термоупругого эффекта в кристаллическом кварце (ТУП), описанный, например, в работах [1—3], используется при измерении энергетических параметров лазерного излучения. Долговременная стабильность приемника и широкий рабочий спектральный интервал (от жесткого ультрафиолета до дальнего ИК-излучения) при большом динамическом диапазоне обуславливают его преимущества при решении ряда фотометрических задач. В частности, при решении таких задач, как измерение оптических характеристик материалов или распределение мощности и энергии излучения лазера по сечению осуществляется построение многоканальных измерительных приборов и систем. Зачастую, для исключения некоторых составляющих погрешностей измерительной системы, значения сигналов отдельных приемников определяются с помощью одного измерительного канала и одного аналого-цифрового преобразователя (АЦП). В таких случаях приходится использовать систему схем выборки-хранения (СВХ) с последовательным опросом, преобразованием и обработкой сигнальных каналов. Система СВХ является аналоговой высокоимпедансной схемой, и ее использование существенно усложняет и удорожает измерительную

систему в целом. Приемник излучения типа ТУП в импульсном режиме работы обладает достаточно характерной реакцией на излучение лазера. Грамотное использование этих особенностей позволяет упростить систему в целом и уменьшить ошибки измерения.

Проанализируем некоторые особенности импульсной характеристики приемника на основе термоупругого эффекта. Анализ целесообразно проводить, представляя приемник излучения в виде полупространства, граница раздела которого характеризуется коэффициентом поглощения излучения  $\alpha_e$ , а материал этого полупространства — коэффициентом теплопроводности  $\lambda_T$ , коэффициентом температуропроводности  $a_T$ , теплоемкостью  $C_T$  и плотностью  $\rho$ .

Если импульсное излучение представить в виде прямоугольного импульса, то тепловое поле полуограниченного пространства, как показано в работах [1, 4] может быть выражено как

$$\vartheta(x, t) = \frac{2\alpha_e E_e \sqrt{t}}{\sqrt{\lambda_T C_T \rho}} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a_T t}}, \quad (1)$$

где  $\vartheta(x, t)$  — тепловое поле полупространства при равномерном освещении  $E_e$  границы раздела;  $x$  — координата, перпендикулярная этой границе; функция  $\operatorname{ierfc}Z$ , согласно [4], является дополнительным интегралом известной функции ошибок Гаусса  $\operatorname{erf}Z$  в пределах от 0 до  $Z$ .

Как показано в работах [1, 2], сигнал ТУП определяется энергией нестационарного температурного поля, запасенной в измерительной пластинке. Следовательно, ТУП представляет собой тепловой приемник излучения, оптимизированный по структуре и конструкции для работы в калориметрическом режиме с минимальной задержкой при формировании выходного сигнала. Это означает, что в течение определенного временного интервала установившееся значение выходного сигнала будет пропорционально интегралу от мощности воздействовавшего импульса излучения. С течением времени нестационарное тепловое поле приемника выходит за пределы измерительной пластинки, что приводит к уменьшению значения его сигнала.

Относительное значение энергии, вышедшей за пределы измерительной пластинки толщиной  $h$ , можно найти, если проинтегрировать выражение (1) в пределах от  $h$  до  $\infty$  и отнести ее к энергии импульса в целом. Согласно работе [3] получим следующее выражение:

$$\delta U_c = 4i^2 \operatorname{erfc} \frac{h}{2\sqrt{a_T t}}. \quad (2)$$

В практике теплофизических расчетов [4] используется понятие обобщенного времени или критерия Фурье

$$F_0 = \frac{a_T t}{x^2}.$$

Преобразуем выражение (2), используя значение критерия Фурье для задней поверхности измерительной пластинки. В результате получим зависимость ошибки интегрирования от обобщенного времени:

$$\delta U_c = 4i^2 \operatorname{erfc} \frac{\sqrt{F_0}}{2}. \quad (3)$$

Как правило, приходится решать обратную задачу — нахождение требуемой толщины измерительной пластинки для измерения энергии импульса определенной длительности при заданном значении допустимой ошибки измерения.

Если допустимую ошибку измерения задать равной, например, 0,01, то с помощью выражения (3) можно найти, используя, в частности, таблицы функций из работы [4], значение критерия Фурье для задней поверхности измерительной пластинки:  $F_0 = 0,25$ .

Материалом измерительной пластинки ГУП является кристаллический кварц X-среза, теплопроводность которого  $a_T = 4,8 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$ . Тогда толщина измерительной пластинки при условии допустимой ошибки 0,01 вычисляется как

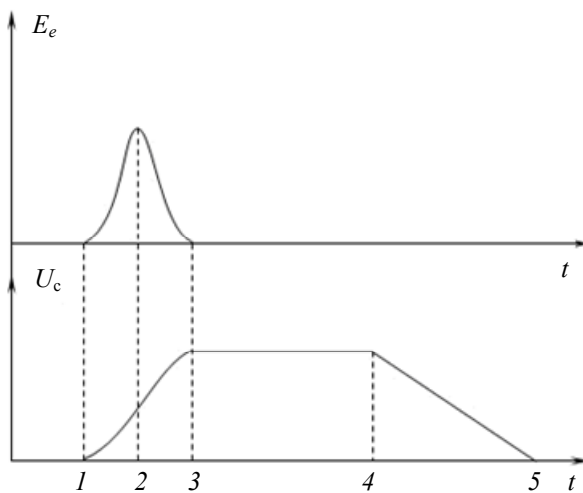
$$h = \sqrt{\frac{a_T t_{\text{и}}}{F_0}} = \sqrt{\frac{4,8 \cdot 10^{-2} t_{\text{и}}}{0,25}} = 0,438 \sqrt{t_{\text{и}}}, \quad (4)$$

где  $t_{\text{и}}$  — длительность импульса, с.

К примеру, при  $t_{\text{и}} = 10^{-4}$  с толщина кварцевой пластинки  $h = 0,0438$  мм. Из технологических соображений минимальную толщину кварцевой пластинки ограничивают значением 0,15 мм, что соответствует допустимой максимальной длительности интегрирования, равной, согласно выражению (4),  $t_{\text{и max}} = 1,17 \cdot 10^{-3}$  с.

Если длительность импульса излучения меньше, чем время максимального интегрирования с заданной погрешностью, то разность между  $t_{\text{и max}}$  и  $t_{\text{и}}$  можно толковать, как временной интервал теплового хранения.

На рисунке приведена временная зависимость реакции приемника излучения от воздействующего импульса. В момент времени  $1$  подается импульс лазерного излучения, и на площадке приемника создается освещенность  $E_e$ .



Действие этого импульса продолжается до момента времени 3. Моменту времени 2 соответствует максимум мощности излучения и максимум крутизны на кривой интегрирования энергии импульса излучения. На интервале от момента 3 и до момента 4 сохраняется постоянное напряжение на выходе приемника излучения, и этот временной интервал может быть использован для последовательного измерения амплитуды сигналов различных приемников в многоканальной фотометрической системе.

По окончании момента 4 начинается процесс затухания сигнала, когда энергия нестационарного теплового поля, накопленная в измерительной пластинке, уходит в демпфер. Согласно работе [3] этот процесс описывается выражением

$$U_c = k \alpha_e E_e \left[ t \left( 1 - 4i^2 \operatorname{erfc} \frac{h}{2\sqrt{a_T t}} \right) - H(t_{\text{и}} - t)(t - t_{\text{и}}) \left( 1 - 4i^2 \operatorname{erfc} \frac{h}{2\sqrt{a_T (t - t_{\text{и}})}} \right) \right], \quad (5)$$

где  $k$  — коэффициент термоупругого преобразования, для кристаллического кварца X-среза равный  $4,82 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{см}^2/\text{Дж}$ ;  $H(t_{\text{и}} - t)$  — функция Хависайда, равная 1 при  $(t_{\text{и}} - t) > 0$  и равная 0 при  $(t_{\text{и}} - t) \leq 0$ .

Особенности динамики затухания сигнала в данной статье не рассматриваются. Важно, что измерение амплитуды сигналов многоканальной системы должно быть закончено до начала процесса их затухания.

Большое значение временного интервала теплового хранения позволяет строить измерительную систему на АЦП среднего быстродействия, совмещенных с микроконтроллерами для предварительной обработки сигнала. В частном случае можно использовать предлагаемые фирмой “Analog Devices” (США) микроконверторы типа ADuC842B [5] с частотой преобразования до 400 кГц и с 12-битовым разрешением.

Выходной импеданс приемников излучения в основном формируется емкостью измерительной пластинки. При площади чувствительной площадки  $A$  ее емкость равна

$$C_{\text{пл}} = \frac{A\varepsilon\varepsilon_0}{h},$$

где  $\varepsilon_0 = 8,84 \cdot 10^{-14}$  Ф/см — диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\varepsilon = 4,5$  — относительная диэлектрическая проницаемость кварца.

При  $A=0,5 \times 0,5=0,25$  см<sup>2</sup> и  $h=0,15$  мм выходная емкость  $C_{\text{пл}} = 6,63$  пФ. При таких малых значениях емкости возникают проблемы, связанные с токами утечки и влиянием монтажных емкостей.

Влияние токов утечки можно компенсировать различными способами. В соответствии с тематикой данной статьи представляет интерес метод быстрых измерений, когда временной интервал между моментами возникновения сигнала и его измерения столь мал, что емкость не успевает разрядиться.

При использовании микроконвертора ADuC842B время одного измерения составляет 2,5 мкс, но число каналов может достигать 16 и более. При 16 каналах цикл измерений составит 40 мкс, в связи с чем потребуется оценить влияние токов утечки, используя понятие сопротивления утечки. В качестве математической модели процесса разряда целесообразно использовать экспоненциальное представление разряда емкости. Если допустимую ошибку разряда приравнять к ошибке интегрирования, то соотношение между постоянной времени контура цепи приемника излучения и временем измерения сигнала будет стремиться к 100. Следовательно, постоянная времени должна быть на уровне 4 мс. При  $C_{\text{пл}} = 6,6$  пФ требуемое значение сопротивления нагрузки с учетом паразитных цепей должно быть равным  $0,5 \cdot 10^9$  Ом. Эта задача выполнима, но обеспечить долговременную стабильность, особенно при многоканальном согласующем усилителе, сложно.

Дополнительные проблемы обеспечения стабильности работы приемника связаны с монтажными емкостями реальной конструкции и входными емкостями согласующего усилителя. Монтажная емкость является шунтирующей по отношению к емкости измерительной пластинки, так же как и входная емкость согласующего усилителя. В результате их влияния значение воспринимаемого сигнала уменьшается. Диапазон изменения этих емкостей составляет 5—7 пФ, что может привести к почти 100 %-ному изменению чувствительности приемника.

С другой стороны, в лазерной фотометрии, как правило, не возникает проблем с обеспечением необходимого значения соотношения сигнал/шум. Это позволяет повысить стабильность входных цепей за счет емкостного шунтирования приемника. В этом случае чувствительность приемника согласно [3] определяется как

$$S = \alpha_e k \frac{C_{\text{пл}} + C_{\text{ш}}}{C_{\text{пл}}},$$

где  $C_{\text{ш}}$  — емкость шунтирующего конденсатора.

При достаточном уровне сигнала уменьшение чувствительности в 1000 раз обуславливает возможность построения измерительной системы с входным сопротивлением 0,5 мОм, что гарантирует долговременную стабильность измерительного устройства.

Даже при использовании прецизионных конденсаторов необходимо учитывать технологический разброс реальных значений их емкостей. При использовании в качестве АЦП микроконверторов со встроенным вычислительным ядром (например, ADuC842B) реальный разброс чувствительности многоэлементного приемника излучения может быть скомпенсирован на этапе предварительной обработки сигнала.

Таким образом, при использовании приемника излучения на основе термоупругого эффекта в кристаллическом кварце возможно построение многоканальных измерительных систем с внутренним тепловым хранением результатов измерения для реализации последовательного считывания сигналов. Дополнительным преимуществом таких систем является разнесение во времени процесса измерения параметров лазерного импульса, который

сопровождается интенсивными электромагнитными помехами, и процесса считывания и преобразования сигнала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ишанин Г. Г., Панков Э. Д., Челибанов В. П. Приемники излучения: Учеб. пособие для вузов. СПб: Папирус, 2003. 527 с.
2. Ишанин Г. Г., Польщиков Г. В. Измерительный приемник излучения на термоупругом эффекте в кварце // ПТЭ. 1973. № 5. С 206—208.
3. Польщиков Г. В. Методика учета систематической погрешности термоупругого преобразования измерительного приемника излучения // Метрология. 1981. № 6. С. 46—51.
4. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высш. школа, 1967. 592 с.
5. Электронный ресурс: <<http://www.analog.com/en/analog-microcontrollers/analog-microcontrollers/aduc842/products/product.html>>.

#### *Сведения об авторах*

- Георгий Владимирович Польщиков** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: polschikov@list.ru
- Елена Ивановна Шевнина** — ООО „СокТрейд“, Санкт-Петербург; ведущий инженер; E-mail: eshevnina@soctrade.ru
- Лам Шон Фам** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: psonlamvn@yahoo.com
- Наталья Владимировна Шалыгина** — соискатель; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: SHAL1976@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
компьютеризации и проектирования  
оптических приборов СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию  
26.04.11 г.