



02479030

**2010 10TH INTERNATIONAL
CONFERENCE ON
ACTUAL PROBLEMS OF ELECTRONIC
INSTRUMENT ENGINEERING PROCEEDINGS**

APEIE – 2010

**МАТЕРИАЛЫ X МЕЖДУНАРОДНОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

АПЭП – 2010

Адиабатический метод воспроизведения реперных точек температурной шкалы в миниатюрных ампулах

А. Ф. Бродников
ФГУП «СНИИМ», ГОУ ВПО «СГГА»

Аннотация – Рассмотрены факторы, влияющие на продолжительность площадки плавления чистых металлов в миниатюрных ампулах. Приведены результаты воспроизведения реперной точки плавления галлия в адиабатических условиях.

Ключевые слова – Температурная шкала, реперная точка, адиабатический метод, эталоны температуры, плавление галлия.

I. ВВЕДЕНИЕ

ВНОВОЙ ГОСУДАРСТВЕННОЙ поверочной схеме для средств измерений температуры, разработанной во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, предлагается использовать меры температуры, достоверные погрешности которых (при вероятности 0.95) должны быть на уровне 0,01 – 0,02 °С. Реализуются эти меры, в частности, в виде аппаратуры для воспроизведения реперных точек температурной шкалы. Данная работа является продолжением цикла работ [1,2], направленных на создание таких эталонных мер температуры, реализуемых в миниатюрных ампулах для наиболее востребованного диапазона от 30 до 180 °С.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Преимуществами миниатюрных ампул реперных точек, содержащих менее десяти граммов чистого вещества, являются: малые размеры, удобство перевозки любым видом транспорта, быстрое достижение температуры плавления-затвердевания, возможность использования агрессивных металлов, низкая стоимость и малое потребление энергии. Эти преимущества очевидны по сравнению с традиционными полногабаритными ампулами, содержащими несколько килограммов высокоточного дорогого металла [3] и даже с малогабаритными ампулами [4] с содержанием нескольких сотен граммов металла. К одному из недостатков миниатюрных ампул обычно относят малую длительность фазового перехода (площадки на зависимости температура-время)

плавления или затвердевания. Задачей данной работы является демонстрация возможности использования адиабатического теплового режима миниатюрных ампул для увеличения длительности воспроизведения температуры реперных точек.

III. ТЕОРИЯ

В традиционных тепловых блоках, содержащих ампулы реперных точек, задают температурный ход нагревания или охлаждения ампулы таким, чтобы перегрев или недогрев ее был незначительным по отношению к температуре фазового перехода. Этим обеспечивается медленный (с малой скоростью измерения температуры ампулы) подход к «площадке» плавления (затвердевания). Однако при наступлении фазового перехода температура ампулы стабилизируется, а температура, например, термостата или печи продолжает изменяться. При этом разность температуры печи и ампулы возрастает, а следовательно, увеличивается тепловой поток Q между ними.

Площадка, например, на кривой плавления будет длиться до тех пор, пока количество теплоты, подводимого этим тепловым потоком, не превысит теплоту плавления H вещества в ампуле, то есть пока выполняется условие

$$Q\Delta t \leq H, \quad (1)$$

где Δt – время плавления.

Отсюда следует, что если при наступлении фазового перехода исключить тепловой поток Q , то стабилизация температуры плавления или затвердевания может продолжаться неограниченное время. С другой стороны это обстоятельство показывает, что имеется принципиальная возможность использовать в качестве реперных точек ампулы со сколь угодно малой массой навески [1].

В связи с этим целесообразно осуществлять плавление или затвердевание навески металла при адиабатическом тепловом режиме ампулы [5]. Остаточный тепловой поток Q в этом случае, обусловленный неидеальной адиабатизацией ампулы определяют, как известно

[6], суммированием всех составляющих теплообмена между ампулой и экраном.

$$Q = Q_{\lambda} + Q_{\alpha} + Q_{\varepsilon}, \quad (2)$$

где Q_{λ} – кондуктивный тепловой поток в воздушном зазоре и по проводам, находящимся между ампулой и экраном; Q_{α} – конвективный тепловой поток в воздушном зазоре; Q_{ε} – радиационный тепловой поток в системе ампула–экран.

Кондуктивный тепловой поток рассчитывают по формуле:

$$Q_{\lambda} = \left(\frac{\lambda_{\varepsilon} F}{d} + \frac{\lambda_{np} S_{np}}{l} \right) \Delta T, \quad (3)$$

где λ_{ε} , d – теплопроводность и толщина воздушно-го зазора; λ_{np} , S_{np} , l – эффективные значения теплопроводности и площади поперечного сечения проводов и их длина; F – эффективная площадь теплообмена в системе ампула–экран; ΔT – разность средних значений температуры ампулы и экрана.

Конвективный теплообмен рассчитывают по формуле:

$$Q_{\alpha} = \alpha F_{\sigma} \Delta T, \quad (4)$$

где α – коэффициент теплоотдачи на поверхности ампулы, F_{σ} – площадь поверхности ампулы.

Радиационный тепловой поток рассчитывают по формуле:

$$Q_{\varepsilon} = \varepsilon \sigma (T_{\sigma}^4 - T_{\varepsilon}^4) F_{\sigma}, \quad (5)$$

где ε – эффективный коэффициент черноты в системе ампула–экран; σ – константа Стефана–Больцмана; T_{σ} , T_{ε} – температура ампулы и экрана.

Для условий, близких к адиабатическим, можно полагать, что $T_{\sigma} \approx T_{\varepsilon}$ и из (5) следует известная приближенная формула:

$$Q_{\varepsilon} = 4\varepsilon \sigma T_{\sigma}^3 F_{\sigma} \Delta T. \quad (6)$$

С учетом этого итоговая формула для расчета остаточного теплового потока имеет вид:

$$Q = \left(\frac{\lambda_{\varepsilon} F}{d} + \frac{\lambda_{np} S_{np}}{l} + \alpha F_{\sigma} + 4\varepsilon \sigma T_{\sigma}^3 F_{\sigma} \right) \Delta T, \quad (7)$$

где в скобках находится выражение для расчета суммарного эффективного коэффициента теплоотдачи в системе ампула–адиабатический экран.

Формула (7) с учетом условия (1) позволяет рассчитать длительность плавления (затвердевания) при тепловом режиме ампулы, близком к адиабатическому ($T_{\sigma} \approx T_{\varepsilon}$):

$$\Delta \tau = H / \left(\frac{\lambda_{\varepsilon} F}{d} + \frac{\lambda_{np} S_{np}}{l} + \alpha F_{\sigma} + 4\varepsilon \sigma T_{\sigma}^3 F_{\sigma} \right) \Delta T \quad (8)$$

Выше было указано, что одним из преимуществ миниатюрных ампул является возможность использования агрессивных металлов, так как их масса незначительна и не представляет опасности при эксплуатации. К таким металлам относятся, в частности, щелочные металлы, значения температуры плавления которых удивительным образом перекрывают наиболее актуальный для теплотрии диапазон температуры (см. Табл. I). В таблице приведены также сведения о свойствах галлия и индия. Все находящиеся в таблице металлы могут быть использованы в качестве мер температуры в различных комбинациях. Когда требования к метрологической надежности результатов поверки средств измерений температуры особенно высоки, можно использовать все эти меры в совокупности.

ТАБЛИЦА I
СВОЙСТВА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ИМЕЮЩИХ
ТЕМПЕРАТУРУ ПЛАВЛЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ 30+180 °С [7,8]

Элемент	C_p , кДж/(кг·К)			$t_{пл}$, °С	ρ , 10 ³ кг/м ³	ΔH , кДж/кг
	150 К	250 К	400 К			
Ga	0,316	0,375	0,395	30	5,90	80
In	0,218	0,229	0,250	156	7,31	28
K	0,666	0,717	0,805	63	0,86	61
Na	1,070	1,180	1,370	98	0,97	114
Li	2,650	3,380	3,940	180	6,94	137
Rb	-	0,330	-	39	1,53	25
Cs	0,203	0,220	0,240	29	1,87	18

Приведенные в таблице сведения содержат также данные об удельной теплоте плавления металлов, что необходимо для расчета длительности площадки плавления (затвердевания) по формуле (8).

Данные об удельной теплоемкости металлов, содержащиеся в таблице, позволяют рассчитать скорость v нагревания ампулы в адиабатическом режиме при непрерывном вводе в него тепла:

$$v = P_H / (m_1 c_1 + m_2 c_2), \quad (9)$$

где P_H – мощность нагревателя ампулы; m_1 , c_1 – удельная теплоемкость и масса материала ампулы; m_2 , c_2 – удельная теплоемкость и масса чистого металла, находящегося в ампуле.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для экспериментального исследования возможностей адиабатического метода воспроизведения температуры реперных точек в миниатюрных ампулах создана измерительная установка, схема которой представлена на Рис. 1.

Миниатюрная ампула 2, с навеской чистого металла в виде цилиндра, изготовленная из фторопласта, размером 30×9 мм, размещается внутри экрана 4, имеющего вид металлического тонкостенного стакана размером 80×20 мм. На поверхности ампулы и экрана намотаны нагреватели из манганинового провода толщиной 0,1 мм. Для уменьшения радиационной составляющей теплообмена между ампулой и экраном их поверхности, обращенные друг к другу, покрыты тонкой полированной фольгой из алюминия. Для контроля адиабатических условий используется дифференциальная термопара 5, один спай которой расположен на внешней поверхности ампулы, а другой – на внутренней поверхности экрана. Сигнал (ТЭДС) термопары управляет работой регулятора температуры 6, который подбирает такую мощность нагревателя экрана, чтобы его температура была равна температуре ампулы. Этим достигается адиабатический тепловой режим ампулы, при котором ее теплообмен с экраном практически сводится к нулю.

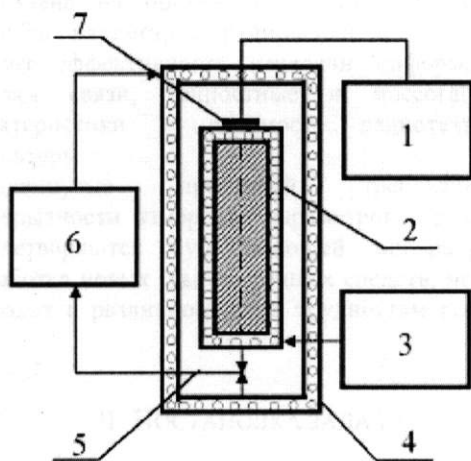


Рис. 1. Схема экспериментальной измерительной установки

Нагреватель ампулы подключен к регулируемому источнику постоянного напряжения 3. Изменяя мощность нагревателя можно выбирать скорость нагревания ампулы.

На установке проведены исследования процесса плавления галлия массой 7.5 г. Нагрев ампулы осуществлялся подведением электрической мощности (мВт) к ее нагревателю. Температура экрана постоянно поддерживалась равной (с погрешностью ± 0.02 °С) температуре ампулы. При наступлении площадки плавления, которое фиксировалось измерителем 1 по стабилизации сигнала датчика температуры 7 ампулы, ее нагреватель выключали. Адиабатический режим при этом продолжали поддерживать по нулевому сигналу дифференциальной термопары.

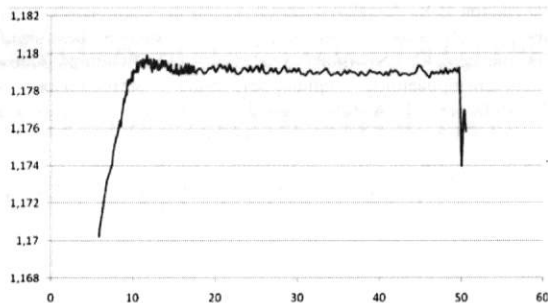


Рис. 2. Зависимость ТЭДС (мВ) термопары медь-константан от времени (мин.) при плавлении галлия

На Рис. 2 приведена одна из типичных зависимостей изменения и стабилизации температуры ампулы с галлием при его плавлении.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ зависимости показывает, что стабилизация ТЭДС датчика температуры ампулы при плавлении галлия длится около 40 минут. Расчет по формуле (8) для условий проведения эксперимента показывает, что эта длительность должна составлять несколько часов. Полученное расхождение между данными расчета и эксперимента требует дополнительного совершенствования измерительной установки и методики измерений. Нестабильность ТЭДС при плавлении галлия не превышает ± 0.5 мкВ, что в пересчете на значения температуры составляет 12.5 мК. Этот показатель уже соответствует требованиям, предъявляемым к рабочим эталонам температуры в соответствии с существующей и разрабатываемой поверочными схемами.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают возможность и перспективность использования миниатюрных ампул реперных точек, в том числе, на основе новых, ранее неиспользуемых металлов, в качестве мер температуры и, прежде всего, в наиболее востребованном диапазоне температур теплоносителя в системах теплоснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Бродников А.Ф., Черепанов В.Я. Анализ возможностей создания новых реперных и постоянных точек температурной шкалы // Приборы, 2007. № 8. С. 15–19.
- [2] Бродников А.Ф., Черепанов В.Я. Результаты исследований и перспективы использования миниатюрных ампул реперных точек для воспроизведения и передачи температурной шкалы // Измерительная техника, 2009. № 10. С. 49–52.
- [3] Куинн Т. Температура. – М.: Миф, 1985. – 448 с.
- [4] Шевелев Ю.В., Черепанов В.Я. Реализация реперных точек температурной шкалы в малогабаритных ампулах // Измерительная техника, 2004. № 2. С. 39–42.
- [5] Szymrka-Grzebik A., Lipinski L. Криогенные эталоны в Польше // Приборы, 2007. № 7. С. 39–42.

- [6] Черепанов В.Я. Адиабатический метод формирования и измерения тепловых потоков в эталонах физических величин // Сб. материалов научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2006». Специализированное приборостроение, метрология. – Новосибирск: СГГА, 2006. т.4, ч.2. С. 201-206.
- [7] Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева – М.: Энергия, 1975. – 744 с.
- [8] Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

Запись голограмм в терагерцовом диапазоне с помощью лазера на свободных электронах

Юлия Ю. Чопорова¹, Борис А. Князев^{2,3}, Василий В. Герасимов^{2,3}, Максим Г. Власенко^{2,3}

¹ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

² Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия

³ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Аннотация – Исследования в терагерцовом диапазоне на начальной стадии велись с использованием широкополосных источников пикосекундной длительности, имевших очень низкую среднюю мощность. Появление мощных монохроматических источников (таких, как лазеры на свободных электронах) открывает возможность применения в данной области спектра классических оптических методов исследования. В статье представлены результаты экспериментов по записи голограмм в терагерцовом диапазоне, в том числе в режиме реального времени, выполненных на Новосибирском лазере на свободных электронах.

Ключевые слова – голография, терагерцовый диапазон, лазер на свободных электронах.

частоте повторения 100-пикосекундных импульсов 5.6 МГц, позволяет решить ряд задач, не доступных пока ни одной из исследовательских групп мира, работающих на других источниках терагерцового излучения.

В ближайшем будущем можно ожидать появления относительно мощных, коммерчески доступных пользователям источников терагерцового излучения, таких как квантовые каскадные лазеры [5] и компактные лазеры на свободных электронах [6, 7], по этой причине реализация классических оптических методов в терагерцовом диапазоне является актуальной задачей.

Настоящая работа посвящена разработке методов записи голограмм в терагерцовом диапазоне.

I. ВВЕДЕНИЕ

ОСВОЕНИЕ терагерцового диапазона частот, длительное время сдержавшееся из-за отсутствия источников и подходящих приемников излучения, началось на рубеже 80-х и 90-х годов прошлого столетия после изобретения широкополосных импульсных источников на основе фемтосекундных лазеров. В качестве приемников и источников чаще использовались либо фотопроводящие антенны [1], либо электрооптические кристаллы [2]. Крайне малая длительность импульса и очень малая средняя мощность, приводят к ряду ограничений, которые не позволяют решить ряд задач, доступных для классических оптических методов исследования. Целый ряд методов, хорошо известных для оптического диапазона, до сих пор не реализован и даже не исследован в терагерцовом диапазоне.

С появлением мощного Новосибирского лазера на свободных электронах [3, 4], генерирующего монохроматичное, когерентное, перестраиваемое по частоте терагерцовое излучение, открылась возможность для перенесения в этот диапазон классических оптических методов исследования. Рекордная средняя мощность излучения, достигающая сотни ватт при

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задачей данной работы является исследование голографических схем с использованием Новосибирского лазера на свободных электронах для амплитудных, фазовых и амплитудно-фазовых объектов. На первой стадии основное внимание уделялось разработке голографических систем и методов записи голограмм, хотя при их разработке рассматривались возможные алгоритмы восстановления изображений. Следует отметить, что “аналоговые” запись и восстановление голограмм в терагерцовом диапазоне невозможно. Голограмма, записанная любым доступным в этом диапазоне способом, представляет собой “цифровую голограмму”, и, следовательно, относится к области цифровой голографии.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Лазер на свободных электронах (ЛСЭ) генерирует излучение в виде последовательности импульсов, длительность которых зависит от длины электронного пучка и отстройки резонатора. Длина волны лазера может перестраиваться от 110 до 240 мкм. Все даль-

нейшие эксперименты выполнены при длине волны около 130 мкм. Длительность импульса Новосибирского ЛСЭ составляет около 100 пс, что соответствует длине светового цуга порядка 30 мм. Следовательно продольная длина когерентности излучения не может превышать эту величину, что ограничивает допустимую разность хода лучей. Исследуемый образец может иметь достаточно большую оптическую толщину, поэтому оптическая схема должна позволять независимую регулировку одного из плеч интерферометрической или голографической системы.

Наиболее подходящей оптической системой является модифицированный интерферометр Маха-Цендера (Рис.1) [8]. Этот вариант объединяет в себе сдвиговый интерферометр и интерферометр Майкельсона. Перемещающееся зеркало может служить в качестве компенсирующего или фазосдвигающего элемента. При использовании пучков с s-поляризацией (ТЕ-волна) и увеличении угла падения на лавсановые светоделители свыше 45° интенсивность в плечах интерферометра почти выравнивается, хотя из-за дополнительного отражения в плече с движущимся зеркалом точное выравнивание недостижимо.

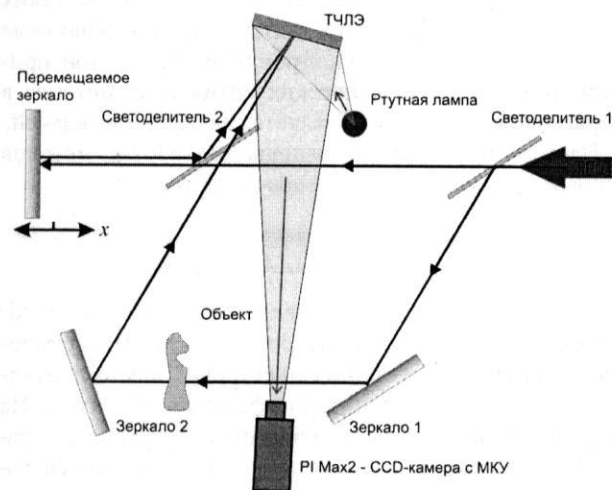


Рис. 1. Схема экспериментов по записи голограмм с опорным пучком. Регистратором терагерцового излучения служил термочувствительный люминесцентный экран

Запись изображений в терагерцовом диапазоне до настоящего времени представляет собой непростую задачу. Для каждой конкретной голографической схемы необходимо оптимальным образом выбирать тип регистратора излучения. Из недавно разработанных регистраторов терагерцовых изображений для наших целей подходят матричный микроболометрический приемник [9] и термочувствительный люминесцентный экран [10].

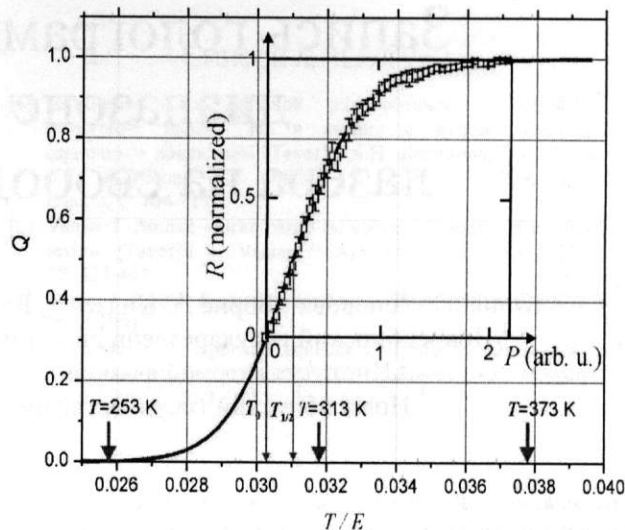


Рис. 2. Калибровочная кривая термочувствительного люминесцентного экрана, измеренная с помощью излучения лазера на свободных электронах. Теоретическая кривая температурного тушения люминесценции, соответствующая закону Мотта, построена путем четырехпараметрической подгонки к экспериментальным данным.

Неохлаждаемый матричный микроболометрический приемник представляет собой матрицу из полупроводниковых болометров размером 320×240 элементов и позволяет записывать терагерцовые изображения с частотой около 25 кадров в секунду. Этот приемник очень чувствителен и имеет пространственное разрешение близкое к волновому пределу, однако малый физический размер матрицы (16.32×12.24 мм) ограничивает его возможности при записи голограмм большого размера.

Набор из восьми термочувствительных люминесцентных экранов (ТЧЛЭ) размером 76×76 мм, имеющих разные чувствительности, постоянные времени и пространственные разрешения, хорошо подходит для записи голограмм большого размера. При освещении ртутной лампой экран люминесцирует в оранжевой области спектра. При освещении экрана инфракрасным или терагерцовым излучением он нагревается, и интенсивность люминесценции в нагретых областях падает из-за ее температурного тушения. Калибровка ТЧЛЭ [10] показала, что отклик системы на интенсивность падающего излучения остается линейным вплоть до величины тушения 50-60% (Рис.2). Постоянная времени экрана, имевшего достаточную чувствительность для использования в описанных ниже экспериментах, равнялась 0.15 сек при пространственном разрешении — четыре линии на мм. Экраны с более высокими характеристиками имеют недостаточную чувствительность. Запись картин тушения люминесценции осуществлялась ПЗС камерой Princeton Instruments PI Max2 с микрочанальным уси-

лителем яркости и матрицей размером 1024×1024 элемента.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Используя описанную выше систему, были проведены эксперименты по записи голограмм по схеме с опорным пучком и осевых (габоровских) голограмм. В первом случае объект помещался в одно из плеч интерферометра Маха-Цендера. Максимальное перекрытие световых пучков достигалось путем перемещения подвижного зеркала в положение, при котором достигался максимальный контраст интерференционной картины, регистрировавшейся матричным микроболометрическим приемником. Затем ММБП заменялся на ТЧЛЭ и выполнялась запись голограмм.

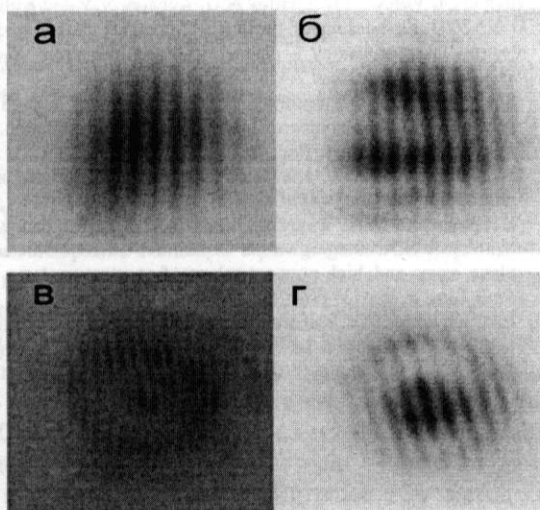


Рис. 3. Изображения терагерцовых голограмм, снятых ПЗС-камерой: (а) Интерферограмма объектного и опорного пучков; (б) голограмма полипропиленовой пластинки с Г-образным вырезом; (в) голограмма фторопластового диска толщиной 3-мм с отверстием в центре; (г) одна из 37 голограмм клиновидного фторопластового цилиндра. Ширина изображений 40 мм.

На интерферограмме опорного и предметного пучков в отсутствие объектов (Рис. 3) видно, что пучки образуют интерференционную картину с прямыми полосами, что свидетельствует о хорошем качестве лавсановых пленочных светоделиителей для терагерцового диапазона, тогда как в видимом диапазоне хорошо видны неоднородности толщины пленок величиной несколько длин волн. Голограммы некоторых других амплитудных, фазовых и амплитудно-фазовых объектов показаны на Рис.3, б-г. Голограмма осесимметричного фторопластового диска с отверстием в центре, например, достаточно симметрична (Рис.3, в),

но изгиб полос свидетельствует, возможно, о деформации, возникшей при сверлении отверстия. Еще одним пробным объектом служил сплошной фторопластовый клиновидный диск толщиной 2 мм с углом наклона около 2° (Рис.3, г). Вращая диск вокруг своей оси в пределах 360 градусов, была получена серия из 37 голограмм (Рис.4). Наклон полос при разных углах поворота позволяет легко определить положение оси симметрии клина и величину угла наклона.

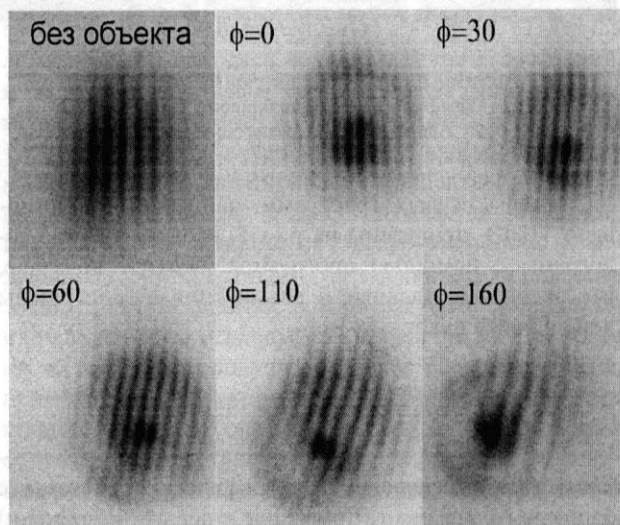


Рис. 4. Некоторые кадры из набора голограмм, полученных при повороте клиновидного диска вокруг своей оси на угол ϕ

Заметим, что схема модифицированного интерферометра Маха-Цендера позволяет реализовать интерферометрию с фазовым сдвигом простым перемещением зеркала на длину, равную некоторой доле длины волны. Смещение фазы опорного пучка на половину периода достигается перемещением зеркала на четверть длины волны. Для длины волны 130 мкм, например, это составляет 32.5 мкм. Такое перемещение легко достижимо с достаточной точностью с помощью простого актуатора, что выгодно отличает терагерцовый диапазон от видимого. Интерферометрию с фазовым сдвигом в варианте двухволновой интерферометрии можно также реализовать, используя уникальную возможность Новосибирского ЛСЭ – плавную перестройку длины волны излучения.

Вторым вариантом голографической системы, которая представляет интерес в терагерцовом диапазоне является Габоровская схема осевой голографии. В терагерцовом диапазоне она удобна, поскольку во многих случаях решает проблему относительно короткой длины когерентности ЛСЭ. Кроме того, в последнее время появились предложения по новым алгоритмам восстановления голограмм, которые могут оказаться полезными в условиях малого числа разрешаемых элементов, что характерно для терагерцовых

изображений, записанных на пределе волнового разрешения.

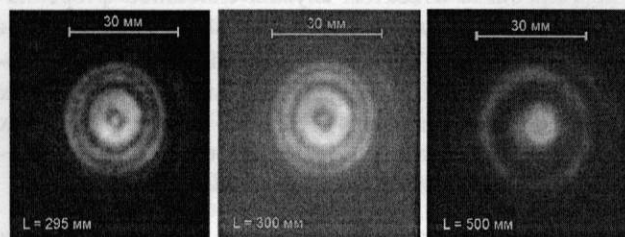


Рис. 5. Голограммы, записанные при разных расстояниях фторопластового кольца толщиной 3 мм и диаметром отверстия 5.5 мм.

Примеры осевых голограмм, записанных с помощью ТЧЛЭ, приведены на рис. 5. Моделирование голограмм с помощью программы ZEMAX показало, что экспериментальные и рассчитанные голограммы хорошо совпадают.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые в терагерцовом диапазоне нами реализованы две классические голографические системы с записью голограмм (в том числе в реальном времени) с помощью мощного монохроматического излучения лазера на свободных электронах. Продемонстрирована возможность записи амплитудных, фазовых и амплитудно-фазовых объектов с помощью матричного микроболлометрического приемника и термочувствительного люминесцентного экрана. Исследуются алгоритмы восстановления терагерцовых голограмм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Auston D. H., Cheung K. P. and Smith P. R. Picosecond photoconductive Hertzian dipoles. *Appl. Phys. Lett.* 45, 284, 1984.
- [2] Auston D. H., Nuss M. C. Electrooptical generation and detection of femtosecond electrical transients. *IEEE J. Quant. Electronics*, 24, 184, 1988.
- [3] Antokhin E A, Akberdin R R, Arbutov V S, Bokov M A, Bolotin V P, Burenkov D B, Bushuev A A, Veremeenko V F, Vinokurov N A, Vobly P D, Gavrilov N G, Gorniker E I, Gorchakov K M, Grigoryev V N, Gudkov B A, Davydov A V, Deichuli O I, Dementyev E N, Dovzhenko B A, Dubrovin A N, et al. 2004 First lasing at the high-power free electron laser at Siberian center for photochemistry research. *Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res.* A528 15-8.
- [4] B A Knyazev, G N Kulipanov, N A Vinokurov. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements. *Measurement Science and Technology*, V. 21, 054017, 13p. 2010.
- [5] Qing Hu. Terahertz Quantum Cascade Lasers and Real-time T-rays Imaging at video rate. *Terahertz Science and Technology*, Vol.2, No.4, December 2009, p. 120.
- [6] Jeong Y U, Lee B C, Kim S K, Cho S O, Cha B H, Lee J, Kazakevitch G M, Vobly P D, Gavrilov N G, Kubarev V V and Kulipanov G N. 2001 First lasing of the KAERI compact far-infrared free-electron laser driven by a magnetron-based microtron. *Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res.* A475 47-50.
- [7] Shevchenko O A, Matveenko A N and Vinokurov N A 2008 Compact ring FEL as a source of high-power infrared radiation. *Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res.* A603 42-5.
- [8] N. George, K. Khare, and W. Chi. Infrared holography using a microbolometer array. *Appl. Opt.* 47, A7-A12 (2008)
- [9] Dem'yanenko M.A., Esaev D.G, Knyazev B.A., Kulipanov G.N., Vinokurov N.A. Imaging with a 90 frames/s microbolometer focal plane array and high-power terahertz free electron laser. *Appl. Phys. Lett.*, V. 92, 131116, 2008.
- [10] B.A. Knyazev, V.V. Kubarev. Wide-field imaging using a tunable terahertz free electron laser and a thermal image plate. *Infrared Physics and Technology*, V. 52, 14, 2009.