

**Калибровка измерительного комплекса и валидация данных при исследовании характеристик диэлектриков в субмиллиметровом диапазоне волн**

В.К. Гавриков<sup>1</sup>, Е.В. Кривенко<sup>2</sup>, В.И. Луценко<sup>2</sup>, Ло Иян<sup>3</sup>, А.В. Поликарпов<sup>2</sup>, В.Г. Яковлев<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Радиоастрономический институт НАНУ, 61002, г. Харьков, ул. Искусств, 4. Тел.: +38(057)7203758, Факс: +38 057 788-48-67, e-mail: [rai@ri.kharkov.ua](mailto:rai@ri.kharkov.ua),

<sup>2</sup>Институт Радиофизики и Электроники им. А.Я. Усикова НАНУ, 61085, Харьков, ул. Проскуры, 12. тел.: +38 (093)-123-2881, Факс: 8 (057) 3152105, e-mail: [secretar@ire.kharkov.ua](mailto:secretar@ire.kharkov.ua)

<sup>3</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского, 61070, Харьков, ул. Чкалова 17 Тел.: +38 057 788-44-28, Факс: +38 057 788-48-67, e-mail: [AutonomEnergy@khai.edu](mailto:AutonomEnergy@khai.edu)

*Рассмотрена калибровка измерительного комплекса субмм диапазона, реализованного на базе газового лазера. Приведена методика эксперимента, его результаты. Делается вывод о том, что предложенная методика валидации результатов может использоваться при определении диэлектрических характеристик материалов.*

*The calibration of the measuring complex of the submm range realized on the basis of a gas laser is considered. The experimental procedure and its results are presented. The conclusion is made that the proposed method of validation of results can be used to determine the dielectric characteristics of materials.*

**Введение**

Освоение терагерцового (ТГц) диапазона частот (1 ТГц-30 ТГц) - одно из наиболее бурно развивающихся направлений современной прикладной физики. Электромагнитные волны терагерцового диапазона отражаются металлами, но они проникают через пластмассы, бумагу, сухую древесину и любые мутные среды, а также мелкодисперсные материалы. В терагерцовом диапазоне лежат вращательные спектры многих органических молекул, включая колебания биологически важных коллективных мод ДНК и белков, а также фоновые резонансы кристаллических решеток, что позволяет развивать новые методы спектроскопии биологических и полупроводниковых структур [1]. Отраженные, поглощенные в среде или прошедшие сквозь нее терагерцовые волны несут в себе богатейшую информацию об объекте. Все это определяет потенциально широкий спектр применения этого излучения.

Наиболее сложными проблемами в освоении терагерцового диапазона является разработка эффективных методов генерации и приема когерентного ТГц излучения. В этом диапазоне частот, который расположен между инфракрасным и микроволновым диапазонами, не применимы хорошо разработанные за последние полвека физические принципы генерации оптического и СВЧ излучений [6-9]. По разным причинам здесь не работают ни методы вакуумной и классической твердотельной электроники, ни стандартные схемы квантовой электроники. Так, создание субмиллиметровых ЛБВ и ЛОВ [8] сопряжено с проблемами малой эффективности катодов, сложного согласования электронного пучка с замедляющей системой и больших потерь в вакуумных волноводах. Для молекулярных (пучковых) мазеров требуются сильное охлаждение и трудно реализуемые высокодобротные микрорезонаторы, а в газоразрядных лазерах инверсия на вращательных переходах, достаточная для генерации, достигается лишь для ограниченного числа линий [9]. Указанного диапазона длин волн не достигают также и лавинно-пролетные диоды и диоды Ганна [6]. Попытки возбуждения короткими (фемтосекундными) оптическими импульсами терагерцовых колебаний за счет создания всплеска поляризации (тока)

субпикосекундной длительности в холодной плазме, в том числе полупроводниковой, или в дипольных антеннах-фотопроводниках ограничиваются слишком малой эффективностью соответствующих процессов "оптического детектирования" [10 - 12]. В целом доступные источники когерентного терагерцового излучения являются маломощными (от нано- до микроватт, редко иногда — до ватт), плохо перестраиваемыми и фактически покрывающими лишь отдельные узкие полосы частот.

Для детектирования терагерцового излучения на сегодняшний день в основном применяются широкополосные приемники излучения, такие как болометры [13-15], пироэлектрические датчики, диоды Шоттки [16, 17], основанные на нелинейности ВАХ перехода металл - полупроводник и фотопроводящие детекторы [18]. Использование же селективных и перестраиваемых детекторов при спектральном анализе позволяет отказаться от дифракционных решеток или механически перестраиваемых интерферометров.

Рассмотрению вопросов генерации, детектирования, методикам калибровок и валидации результатов при измерениях характеристик диэлектриков в субмиллиметровом диапазоне и посвящена данная работа.

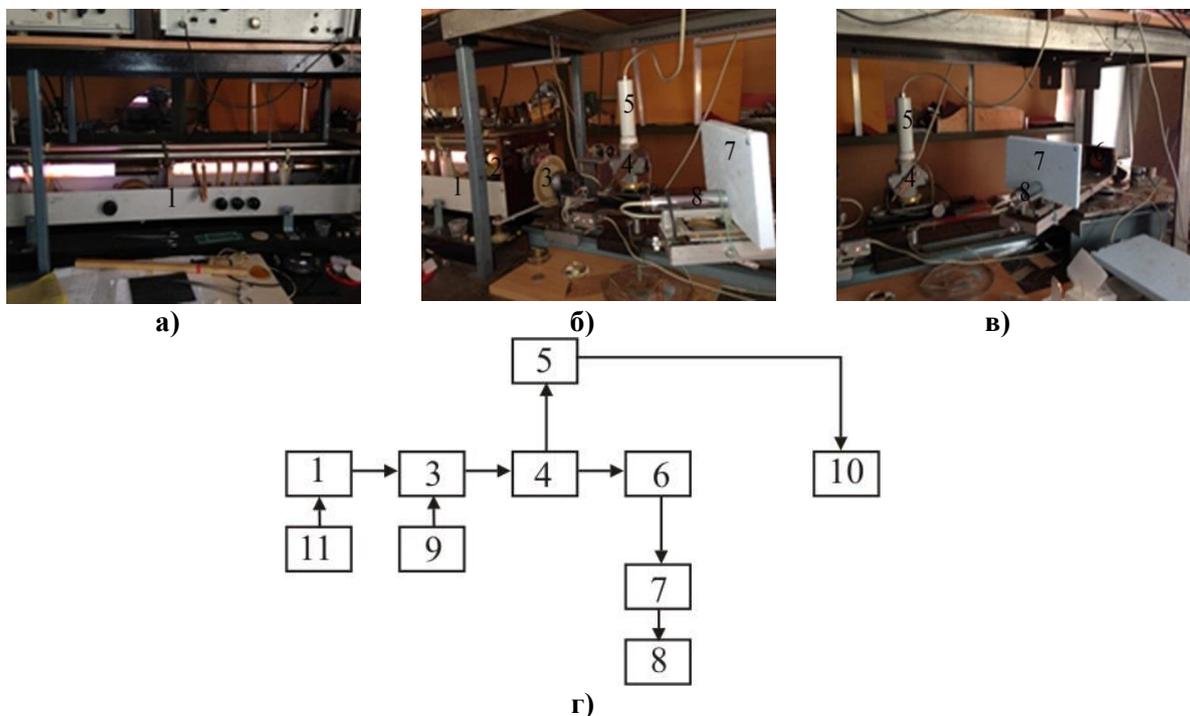
### **1. Аппаратура и методика экспериментов**

Методы измерения, находящие широкое применение в сантиметровом диапазоне (волноводные и резонансные), с большим трудом могут быть применены даже к длинноволновой области миллиметрового диапазона из-за чрезвычайно малых размеров измерительных элементов. В связи с этим в диапазоне субмиллиметровых длин волн используются качественно иные методы, целиком заимствованные из оптики и носящие, в силу этого, название оптических. Идея оптических методов проста и состоит в наблюдении проходящих или отраженных от диэлектрического образца электромагнитных волн, собранных в узкие пучки с помощью подходящих направляющих устройств.

Техническое воплощение этих методов наталкивается, однако, на целый ряд трудностей, обусловленных сложностью генерации и приема электромагнитных волн субмиллиметрового диапазона.

Общий вид измерительной установки приведен на рис.1. Источником излучения является газовый лазер с активной средой в виде смеси газов: метана и азота. Накачка активной среды осуществляется сигналом частоты 12.3МГц. Частота генерации зависит от давления смеси газовых компонент и может изменяться в диапазоне 0,30...0,38мкм. мощность излучения при настройке длины резонатора достигает 10...20мВт. Через полупрозрачное зеркало в виде дифракционной решетки часть сигнала выводится наружу за пределы резонатора. При этом выводится только та поляризация, электрический вектор которой перпендикулярен проволочкам, из которых состоит зеркало. Его модуляция осуществляется при помощи обтюлятора, выполненного в виде круглой металлической пластины, насаженной на вал синхронного электродвигателя, имеющей 8 круглых отверстий. Поскольку частота вращения вала двигателя составляет 50Гц, то частота амплитудной модуляции сигнала лазера составляет 400Гц. Модуляция позволяет осуществить спектральное окрашивание сигнала, облучающего исследуемый образец диэлектрика и тем самым реализовать узкополосный прием на частоте модуляции, что позволяет повысить потенциал измерительного комплекса. Так как в процессе измерений происходит неконтролируемое изменение мощности излучения лазера, например вследствие температурных изменений длины резонатора, то необходимо использование ряда специальных мер снижающих ошибки измерения, вследствие неконтролируемых изменений излучаемой мощности. Так можно регистрировать сигнал в опорном канале и использовать эти данные для внесения

корректив при изменениях уровня излучаемой мощности. Для этого после модуляции пучок поступает на расщепитель сигнала -4 (рис. 1). Ответвленная часть сигнала поступает на приемник опорного канала -5 (рис.1) и после регистрации используется для коррекции изменений уровня излучаемой мощности. В измерительном канале сигнал, прошедший через измерительный образец - 7, регистрируется приемником измерительного канала 8 (рис.1в). В качестве детектора СВЧ сигнала использовался в одном из вариантов пироприемник. Однако он имеет достаточно узкую полосу пропускания по низкой частоте детектированного сигнала и поэтому даже при имевших место в эксперименте частотах модуляции 400Гц наблюдались потери. Поэтому в дальнейшем для детектирования использовали кремниевые точечные СВЧ диоды типа Д407. Они предназначены для работы в 4мм диапазоне волн. При их использовании для детектирования сигнала в субмиллиметровом диапазоне частот, необходима фокусировка падающего пучка на р-п переход при помощи линзы, изготовленной из фторопласта. После предварительных усилителей осуществлялась регистрация сигналов измерительного и опорного каналов при помощи двухканальной звуковой карты персонального компьютера.



**Рис. 1. Измерительный стенд: а- терагерцовый газовый лазер; б- вид на модулятор; в- вид на измерительный канал; г – структура измерительного комплекса; 1- лазер, 2- выход сигнала лазера, 3-обтюратор, 4-расщепитель сигнала, 5- приемник опорного канала, 6- отражающее зеркало, 7- измерительный образец, 8- приемник измерительного канала, 9- двигатель, 10-РС, 11-генератор накачки.**

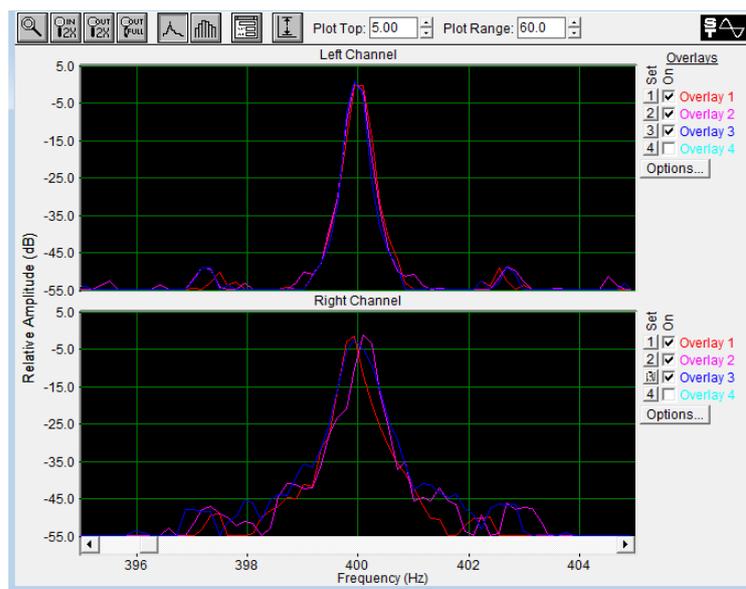
Измерительные образцы были выполнены в виде плоско-параллельных пластинок, устанавливаемых на пути распространения сигнала лазера к приемнику. Регистрация сигнала, прошедшего через исследуемый образец позволяет оценить прозрачность исследуемого материала. Для устранения погрешностей, связанных с неконтролируемыми изменениями мощности излучения лазера дополнительно к регистрации сигнала в измерительном канале, в котором размещался исследуемый образец, осуществлялась его регистрация и в опорном канале, используемом для контроля мощности излучения лазера. При проведении исследований необходимо

учитывать, что отраженный от пластины обтюлятора либо исследуемого образца сигнал, попадая в активную среду лазера, может приводить за счет внутреннего автодинного эффекта к изменению излучаемой мощности, что будет сказываться на ошибке измерений. Для устранения этого эффекта необходимо элементы, от которых может возникать обратный отраженный сигнал ориентировать таким образом, чтобы отражения от них не попадали в лазер (под небольшим углом к направлению распространения пучка).

Для оценки амплитуды сигналов в измерительном и опорном каналах на частоте модуляции был разработан алгоритм автоматического ее обнаружения и измерения. После осуществления БПФ по сегменту реализации длительностью 65536 отсчетов при частоте дискретизации 10КГц (разрешение по частоте 0,153 Гц) в стробе, установленном в окрестности частоты модуляции  $400 \pm 10$  Гц, осуществлялось обнаружение спектральной компоненты с максимальным значением, которая и использовалась при дальнейших расчетах.

Предварительно оценивалось влияние нестабильности частоты вращения двигателя на ширину спектра модулированного сигнала. Установлено, что дисперсия Алана для выбегов частоты, связанной с нестабильностью вращения двигателя не превышает 0,12Гц.

Это иллюстрирует рис.2, на котором приведены спектры сигнала в опорном и измерительном каналах, полученные по нескольким последовательным временным сегментам.



**Рис.2. Спектры сигнала на выходе опорного (верхние кривые) и измерительного (нижние кривые) каналов в несколько последовательных моментов времени.**

В качестве примера на рис.3 представлены спектры сигналов опорного - рис.3а и измерительного – рис.3б каналов в широкой и узкой полосах анализа при отсутствии и наличии измерительного образца, а также уровень паразитного фона, одной из причин которого может быть микрофонный эффект, вызванный вибрациями двигателя. Кроме того присутствуют паразитные частоты на гармониках частоты промышленной сети. Видно, что на частоте модуляции 400Гц наблюдается максимум спектральной плотности. Измерение спектральной плотности на частоте 400 Гц и используются для оценки характеристик исследуемого материала (коэффициента прозрачности  $T$ , а в дальнейшем постоянных распространения  $\beta$  и затухания  $\alpha$ , а также действительной  $n'$  и мнимой  $n''$  частей коэффициента преломления). Следует отметить (рис.2а), что

наличие измерительного образца не сказывается на сигнале в опорном канале. В измерительном канале введение образца приводит к уменьшению уровня сигнала. Динамический диапазон сигнала на частоте модуляции относительно уровня шума (рис.2 б) составляет около 60...70дБ. В тоже время уровень паразитного фона на частоте модуляции может его ограничивать величиной 37...45 дБ.

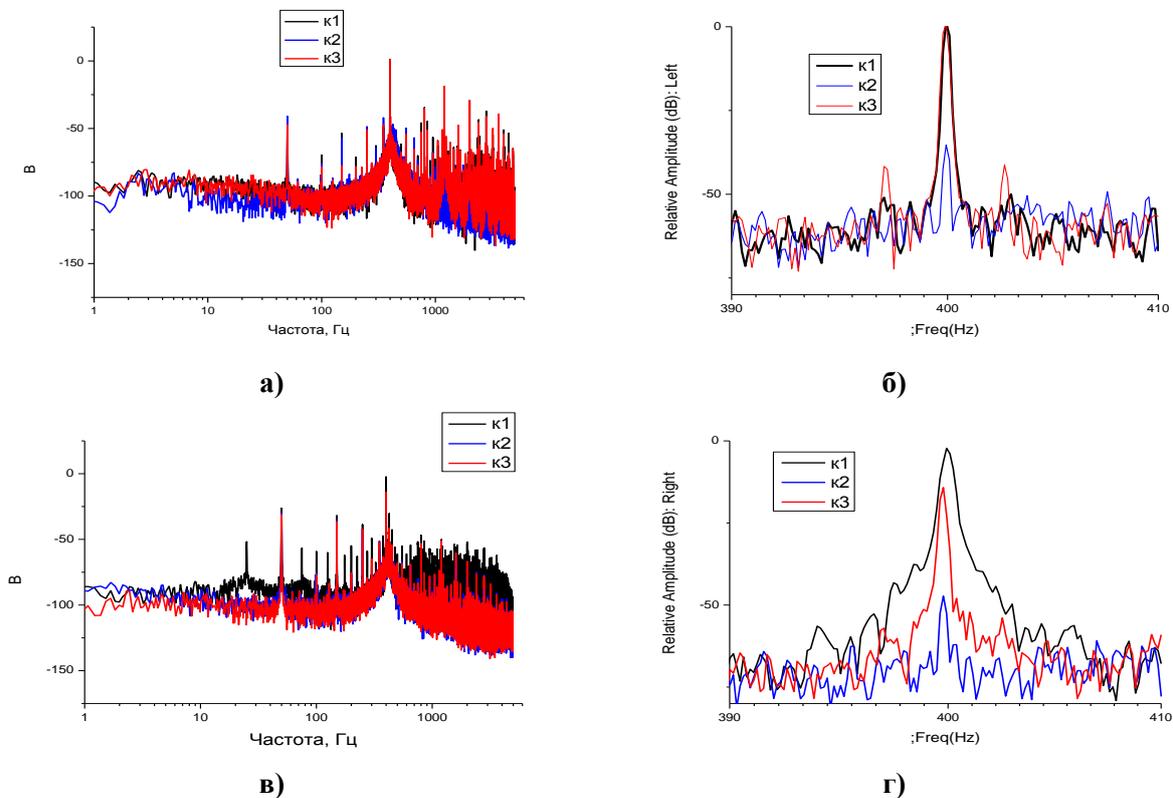


Рис. 3. Спектры сигналов опорного (а, б) и измерительного (в, г) каналов в широкой (а, в) и узкой (б, г) полосах анализа: К1- калибровочные сигналы без образца; К2- уровень фона при отсутствии полезного сигнала; К3- сигналы при наличии измерительного образца.

## 2. Расчетные соотношения для оценки прозрачности материала по результатам экспериментальных измерений

Стандартная методика оценки коэффициента прозрачности исследуемого материала состоит в сравнении сигнала измерительного канала при наличии и отсутствии образца  $\frac{S^{Rk}}{S^{R1}}$ . Кроме того необходимо учитывать возможные колебания мощности излучения лазера по изменениям сигнала в опорном канале  $\frac{S^{L1}}{S^{Lk}}$ . Поскольку измерения проходят при малых уровнях сигналов, то детектор работает в квадратичном режиме. Поэтому уровень сигнала с его выхода будет пропорционален мощности

$$T^k [dB] = 10 \lg \left( \frac{S^{Rk}}{S^{R1}} * \frac{S^{L1}}{S^{Lk}} \right) = 10 \lg \left( \frac{S^{Rk}}{S^{Lk}} * \frac{S^{L1}}{S^{R1}} \right) = 10 \lg \left( \frac{S^{Rk}}{S^{R1}} \right) - 10 \lg \left( \frac{S^{Lk}}{S^{L1}} \right), \quad (1)$$

где  $S^{Rk}$  – сигнал правого канала (измерительного) в «к» кадре;

$S^{R1}$  – сигнал правого канала (измерительного) в 1 кадре (калибровка);

$S^{L1}$  - сигнал левого канала (опорного) в 1 кадре (калибровка);

$S^{Lk}$  - сигнал левого канала (опорного) в «к» кадре (измерения);

$\frac{S^{Rk}}{S^{R1}}$  – коэффициент передачи по измерительному каналу для k – образца по отношению к калибровочному кадру k=1;

$\frac{S^{L1}}{S^{Lk}}$  – коэффициент, учитывающий изменение уровня сигнала (мощности излучения) лазера в k -кадре по сравнению с калибровкой (изменение уровня сигнала опорного канала в k -кадре по сравнению с калибровкой);

$\frac{S^{Rk}}{S^{Lk}}$  – коэффициент, учитывающий поглощения сигнала в k -кадре по сравнению с опорным каналом;

$\frac{S^{L1}}{S^{R1}}$  коэффициент, учитывающий разницу в коэффициентах передачи опорного и измерительного каналов.

Очевидно, что при рассмотренном подходе наличие паразитного фона частоты модуляции приводит к существенным ограничениям диапазона измерения при оценке поглощения исследуемыми материалами. Для его расширения можно использовать методы, используемые в радиометрии.

### 3. Оценка прозрачности с компенсацией уровня фона

При рассмотренном подходе диапазон измерения коэффициентов прозрачности ограничивается уровнем фона. В радиометрических приемниках, как правило, оценивают приращение температуры по сравнению с фоном. Аналогичный подход можно использовать и при оценке коэффициента прозрачности материала. Степень затухания излучения в нем оценивается, рассматривая уровень фона, как некоторую шумовую подставку.

Для этого используются значения уровня фона в ситуации, когда ставится поглотитель сигнала на выходе лазера. Остаток – это шумовой фон на рабочих частотах. Он может быть обусловлен микрофонным эффектом, вызываемым, например вибрациями элементов конструкции из-за работающего двигателя. Полезный сигнал может изменяться от максимального уровня (при отсутствии на пути сигнала образца) до уровня фона. Если его вычесть, то можно расширить пределы измерения затуханий в каналах и тем самым расширить динамический диапазон измерений.

$$T^k[dB] = 10 \lg \left( \frac{S^{Rk} \frac{S^{L1}}{S^{Lk}} - S^{R2}}{S^{R1} - S^{R2}} \right), \quad (2)$$

где  $S^{R2}$  – сигнал измерительного канала во 2 кадре - фон.

Соотношение (2) переходит в (1) при уровне фона в измерительном канале равном нулю, т.е.  $S^{R2} = 0$ .

Можно учитывать влияние фона не только в измерительном канале, но и в опорном. Если учесть еще поправку и на фон в опорном канале, то соотношение (2) приобретает вид:

$$T^k[dB] = 10 \lg \left( \frac{S^{Rk} \frac{(S^{L1} - S^{L2})}{(S^{Lk} - S^{L2})} - S^{R2}}{S^{R1} - S^{R2}} \right). \quad (3)$$

При  $S^{L2} = 0$ , оно трансформируется в соотношение (2), а если и  $S^{R2} = 0$ , то в соотношение (1).

Таким образом, соотношения (1-3) могут использоваться для оценки коэффициента прозрачности материала без учета остаточного фона (1), а также с его учетом в измерительном канале (2) и в обоих каналах (3) (измерительном и опорном каналах).

### 4. Результаты экспериментов и их обсуждение

Результаты измерения поглощения некоторыми типами диэлектриков в субмиллиметровом диапазоне представлены в табл.1. Там же даны результаты оценок

коэффициента прозрачности (поглощения) при использовании для оценки различных подходов по формулам (1-3).

Следует отметить, что использование компенсации фона позволяет существенно расширить диапазон измерения коэффициентов прозрачности материалов. При малых затуханиях материалов все три подхода дают примерно одинаковые результаты, однако при больших затуханиях предпочтительнее использовать методы компенсирующие влияние фона и позволяющие расширить динамический диапазон измерения.

В этой же таблице приведены оценки удельного погонного затухания  $L[dB/mm]$ , полученные с использованием соотношения:

$$L[dB/mm] = \frac{T^k[dB]}{h[mm]}, \quad (4)$$

где  $h[mm]$  – толщина слоя материала.

Следует отметить, что при этом полученные оценки завышены, за счет того, что в коэффициент прозрачности входят потери за счет отражения от границ диэлектрика. Несмотря на это полученные данные позволяют осуществлять выбор диэлектриков при разработке устройств, работающих в субмиллиметровом диапазоне волн.

**Таблица 1. Результаты оценок коэффициента прозрачности.**

Тип образца	Толщина а, мм	Коэф. прозрачности дБ (Ф1)	Коэф. прозрачности дБ (Ф2)	Коэф. прозрачности дБ (Ф3)	Удельный коэф. прозрачности дБ/мм(Ф1)	Удельный коэф. прозрачности дБ/мм(Ф2)	Удельный коэф. прозрачности дБ/мм(Ф3)
ситал	1.94	-11.17	-11.41	-11.41	-5.58	-5.88	-5.88
лейкосапфир	2.26	-3.93	-3.96	-3.97	-2.06	-1.75	-1.76
кварц плавленный	4.3	-6.11	-6.17	-6.17	-1.54	-1.43	-1.43
оргстекло	2.99	-15.67	-16.45	-16.46	-5.80	-5.50	-5.51
гетинакс	0.1	-7.37	-7.46	-7.46	-75.76	-74.60	-74.6
Полистирол	5.06	-3.16	-3.18	-3.17	-0.03	-0.63	-0.63
пенопласт синий	20	-2.08	-2.09	-2.08	-0.10	-0.10	-0.10
винипласт	1.86	-9.11	-9.26	-8.99	-4.90	-4.98	-4.83
поликор	1.01	-9.52	-9.67	-9.66	-9.42	-9.59	-9.57
слюда	0.72	-11.86	-12.16	-12.07	-17.92	-16.89	-16.77
флан	0.98	-8.12	-8.23	-8.23	-8.29	-8.40	-8.40
текстолит	1.17	-21.73	-26.63	-26.62	-18.54	-22.76	-22.75
тефлон	8.55	-2.15	-2.16	-2.14	0.79	-0.25	-0.25
стекло	3.47	-23.27	-37.92	-37.29	-5.68	-10.93	-10.75
гетинакс	1.08	-13.60	-14.06	-13.96	-12.30	-13.02	-12.93

### Заключение

1. При создании измерительных комплексов субмиллиметрового диапазона для устранения влияния неконтролируемых изменений уровня излучаемой мощности на результаты измерений необходимо при измерениях и его калибровках регистрировать уровень сигнала в опорном канале.

2. Для повышения потенциала измерительной системы целесообразно использовать модуляцию излучаемого сигнала при помощи обтюлятора, т.е. использование модуляционного радиометрического принципа приема.

3. Для расширения динамического диапазона измерения затуханий в исследуемых образцах можно использовать принцип компенсации фона аналогично тому, как это

делают при радиометрическом приеме, причем компенсацию целесообразно осуществлять как в канале измерений, так и калибровки.

4. Погонное затухание для лучших из диэлектриков: пенопластов упаковочного и строительного, полистирола, с учетом отражений от их границ, имеет величину (0.03...0.4) дБ/мм, возрастая до (1,5...7) дБ/мм для плавленого кварца, лейкосапфира, винипласта, оргстекла и флана. Для текстолита и гетинакса оно превышает 20 дБ/мм и несколько меньше для стеклотекстолита. Полученные значения коэффициентов прозрачности характеризуют возможности использования различных диэлектриков в субмиллиметровом диапазоне волн.

### Литература

1. Smye, S.W. The interaction between terahertz radiation and biological tissue / S.W. Smye, J.M. Chamberlain, A.J. Fitzgerald and E. Berry // *Phys. Med. Biol.* - 2001. - Vol.46. - P.R101-R112.
2. Dudovich, N. Single-pulse coherently controlled nonlinear Raman spectroscopy and microscopy / N. Dudovich, D. Oron, and Y. Silberberg // *Nature.* - 2002. - Vol.418. - P.512-514.
3. Cole, B.E. Coherent manipulation of semiconductor quantum bits with terahertz radiation / B.E. Cole, J.B. Williams, B.T. King, M.S. Sherwin and C.R. Stanley // *Nature.* - 2001. - Vol.410. - P.60-63.
4. Fitzgerald, A.J. An introduction to medical imaging with coherent terahertz radiation / A.J. Fitzgerald, E. Berry, N.N. Zinovev, G.C. Walker, M.A. Smith, and J.M. Chamberlain // *Phys. Med. Biol.* - 2002. - Vol.47. -No.21. - P.R67-R84.
5. Zandonella, C. Terahertz imaging: T-ray specs / C. Zandonella // *Nature.* - 2003. - Vol.424.-P.721-722.
6. Terahertz Sources and Systems (NATO Science Series, Ser. II, Vol.27) / Edited by R.E. Miles, P. Harrison, D. Lippens. - Kluwer Academic Publishers, 2001. - 350pp.
7. Sensing with Terahertz Radiation (Springer Series in Optical Sciences, Vol.85) / Edited by D. Mittleman. - Springer-Verlag, 2003. - 337pp.
8. Van der Weide, D. Applications and outlook for electronic terahertz technology // *Optics & Photonics News.* - 2003. - Vol. 14. - No.4. - P.48-53.
9. Звелто, О. Принципы лазеров. 3-е изд. - М.: Мир, 1990. - 560с.
10. Hu, B.B. Terahertz radiation induced by subband-gap femtosecond optical excitation of GaAs / B. B. Hu, X.-C. Zhang, D.H. Auston // *Physical Review Letters.* - 1991. - Vol.67. - P.2709-2712.
11. Kersting, R. Few-cycle THz emission from cold plasma oscillations /R. Kersting, K. Unterrainer, G. Strasser, H.F. Kauffmann, E. Gornik // *Physical Review Letters.* - 1997. - Vol.79. - P.3038-3041.
12. Matsuura, S. Generation of coherent terahertz radiation by photomixing in dipole photoconductive antennas /S. Matsuura, M. Tani, K. Sakai // *Applied Physics Letters.* - 1997. - Vol.70. -No.5. -P.559-561.
13. Kroug, M. NbN hot electron bolometric mixers for terahertz receivers/ M. Kroug, S. Cherednichenko, H. Merkel, E. Kollberg, B. Voronov, G. Gol'tsman, H.W. Huebers and H. Richter // *IEEE Trans. Appl. Supercond.*-2001.-Vol.11.- P.962-965.
14. Burke, P J. Mixing and noise in diffusion and phonon cooled superconducting hot-electron bolometers / P.J. Burke, R.J. Schoelkopf, D.E. Prober, A. Skalare, в. S. Karasik, M.C. Gaidis, W.R. McGrath, B. Bumble and H.G. LeDuc // *J. Appl. Phys.* - 1999. - Vol.85. - P. 1644-1653.

15. Karasik, B.S. Photon-noise-limited direct detector based on disorder-controlled electron heating / B.S. Karasik, W.R. McGrath, M.E. Gershenson and A.V. Sergeev // J. Appl. Phys. - 2000. - Vol.87. - P.7586-7588.
16. Crow, T.W. Terahertz GaAs devices and circuits for heterodyne receivers / T.W. Crow, R.J. Mattauch, R.M. Weikle and U.V. Bhapkar // Compound Semiconductor Electronics (edited by M. Shur). - Singapore: World Scientific Publishing, 1996. - P.209-246.
17. Marazita, S.M. Integrated GaAs Schottky mixers by spin-on-dielectric wafer bonding / S.M. Marazita, W.L. Bishop, J.L. Hesler, K. Hui, W.E. Bowen, T.W. Crowe //IEEE Trans. Electron Devices. - 2000. - Vol.47. - P. 1152-1157.
18. Haller, E.E. Far infrared photoconductors for space-borne astronomy: a review based on the MIPS 70 micron array / E.E. Haller and J.W. Beeman / Proc. of Far- IR, Sub-mm & mm Detector Technology Workshop, Monterey, April 2002 - P.201.