

## SUBMILLIMETER SPECTROSCOPY

E. M. GERSHENZON

*Devices and methods of measurement with the high spectral resolution for submillimeter range of electromagnetic radiation were developed only during last decades. The article is devoted to the results of the submillimeter spectroscopy obtained due to remarkable monochromatic tuning generators – backward wave oscillator.*

**Субмиллиметровый участок шкалы электромагнитных волн только в последние десятилетия удалось освоить благодаря оснащению аппаратурой и методиками, позволяющими проводить спектральные исследования высокого разрешения. Они стали возможными благодаря созданию замечательных монохроматических перестраиваемых генераторов этого диапазона волн – ламп обратной волны.**

© Гершензон Е.М., 1998

# СУБМИЛЛИМЕТРОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

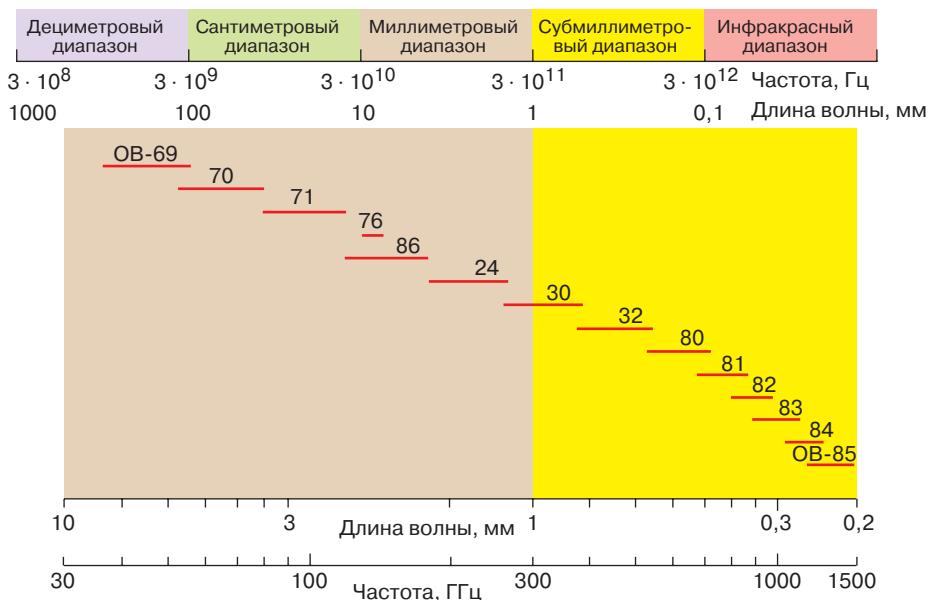
Е. М. ГЕРШЕНЗОН

Московский государственный педагогический университет

## 1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Субмиллиметровые волны, к которым относят электромагнитные волны длиной  $\lambda = 100 - 1000$  мкм (им соответствуют частоты колебаний  $v = 3 \cdot 10^{12} - 3 \cdot 10^{11}$  Гц), занимают промежуточную область между длинноволновым инфракрасным и сверхвысокочастотным радиодиапазоном (рис. 1). Они представляют значительный интерес для радиотехнических применений, радиоастрономии и астрофизики, физики атмосферы, биологии и изучения веществ во всех агрегатных состояниях. Особенность этого участка спектра заключается в том, что присущие ему волны слишком длинны для применения хорошо развитой оптической техники и в то же время слишком коротки для перенесения в него радиометров. Квантовые свойства электромагнитных колебаний, проявляющиеся при взаимодействии их с веществом и заряженными частицами, четко выражены лишь на достаточно высоких частотах. На низких частотах, наоборот, проявляются волновые свойства. Поэтому в сверхвысокочастотных (СВЧ) радиодиапазонах безраздельно господствуют классическая электродинамика и электроника, в инфракрасных и более коротковолновых – методы и средства, соответствующие квантовой электронике и оптике. Субмиллиметровые волны (этот диапазон волн все чаще называют тегерцевым:  $1\text{ ТГц} = 10^{12}\text{ Гц}$ ) находятся на стыке между этими областями.

До последнего времени, несмотря на проникновение методов и аппаратуры, присущих как оптическому, так и миллиметровому диапазонам волн, субмиллиметровый диапазон остается одним из технически слабо оснащенных участков спектра. В течение многих лет его именовали в литературе белым пятном, спектроскопическим провалом. Интенсивность характерных для инфракрасной области спектра источников теплового излучения здесь оказывается очень малой. Температура тепловых излучателей обычно не превышает  $2000^\circ\text{C}$ , и максимум излучения соответствует  $\lambda \approx 1,5$  мкм. Согласно закону Рэлея–Джинса, спектральная плотность излучения на длинных волнах изменяется с увеличением  $\lambda$  пропорционально  $\lambda^{-2}$  и при  $\lambda \sim 1$  мм составляет лишь миллионные доли от энергии излучения в максимуме, а для целей спектроскопии из сплошного спектра при помощи системы фильтров выделяется перестраиваемый участок тем более узкий, чем более высокое разрешение требуется. Применение



**Рис. 1.** Положение субмиллиметрового диапазона на шкале электромагнитных волн и его перекрытие с помощью серии созданных ЛОВ (см. табл. 1)

газоразрядных источников, переход от разложения в спектр с помощью дифракционных решеток (эшелеттов) к фурье-преобразованию спектра не дают качественных изменений. В фурье-спектрометрах получение спектра производится в два приема: сначала регистрируется интерферограмма исследуемого излучения, а затем осуществляется ее гармонический анализ с помощью компьютера, это позволяет регистрировать весь спектр одновременно и использовать входное отверстие прибора существенно больших размеров, чем щель обычного спектрометра, и тем самым увеличить светосилу. Такие спектрометры на субмиллиметровых волнах все равно имеют относительно низкую чувствительность и плохое разрешение. Лазеры субмиллиметрового диапазона, обладающие монохроматичностью и достаточным уровнем мощности, практически не-перестраиваемы и позволяют проводить измерения лишь на фиксированных частотах при изменении магнитного поля или других параметров, что ограничивает возможности исследований.

Попытки создания альтернативных тепловым генераторам субмиллиметрового диапазона предпринимались с конца прошлого века. Наш знаменитый соотечественник П.Н. Лебедев с помощью сконструированного им искрового генератора получил волны короткого миллиметрового диапазона (до  $\lambda \approx 3$  мм), его последователи (А.А. Глаголова-Аркадьева и др.) – еще более короткие. Однако из-за немонохроматичности и малой спектральной плотности излучения метод не нашел широких применений, хотя и дал возможность выполнения пионерских спектральных работ. В 1902 году П.Н. Лебедев в докладе “Шкала электромагнитных волн в

эфире” отмечал, что субмиллиметровый диапазон, соответствующий “молекулярным колебаниям материи”, при освоении встретит существенные трудности: “Сейчас мы не имеем возможности предвидеть, как удастся разрешить это затруднение; во всяком случае... способ получения еще более коротких волн будет очень крупным шагом вперед в области экспериментальной физики”.

1.2. В значительной мере трудности удалось преодолеть около 30 лет назад, в начале 60-х годов, когда М.Б. Голант с сотрудниками создали широкополосные, перестраиваемые управляемым напряжением монохроматические генераторы – лампы обратной волны (ЛОВ), перекрывшие всю коротковолновую часть миллиметрового диапазона и субмиллиметровый диапазон до  $\lambda \approx 0,2$  мм [1].

Основным методом продвижения СВЧ-приборов в более коротковолновые диапазоны в течение многих лет было линейное моделирование. Если при создании нового генератора, рабочая частота которого смешена по отношению к модели, все важные с точки зрения электродинамики и электроники размеры изменить пропорционально длине волны, применяемые значения магнитного поля изменить обратно пропорционально длине волны, а рабочие напряжения сохранить неизменными, то токи нового прибора и его параметры окажутся такими, как у модели, а плотности токов изменятся пропорционально квадрату рабочей частоты. Оказалось, что такому модельному освоению субмиллиметрового диапазона мешают следующие факторы:

- необходимость уменьшения геометрических размеров и расстояний, а также ужесточения допусков на размеры. Если в сантиметровом диапазоне

высокочастотный зазор резонаторов и шаг замедляющих систем составляют 0,5 мм, то в субмиллиметровом диапазоне он должен уменьшиться до 5 мкм, а допуски  $\approx 1\%$  номинального значения — до сотых долей микрометра;

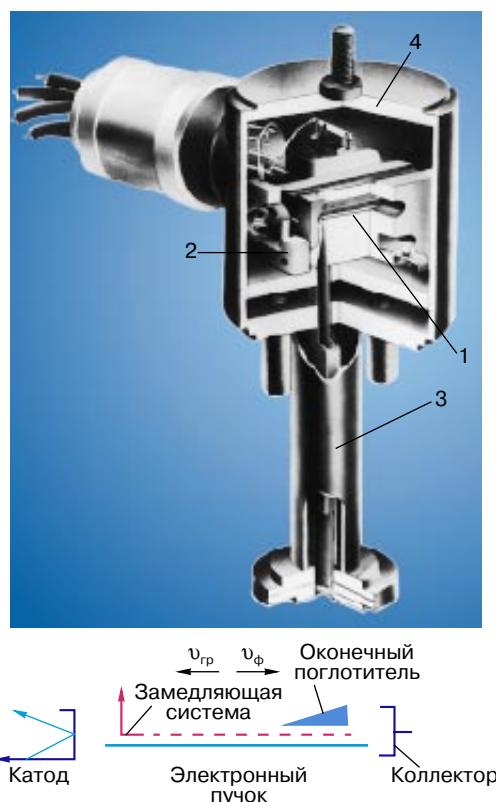
- возрастание омических высокочастотных потерь с укорочением длины волны из-за уменьшения глубины скин-слоя, обратно пропорционального частоте  $v$  (например, для меди она уменьшается при  $\lambda = 0,5$  мм до 0,085 мкм), и возрастающего влияния на потери качества обработки поверхности резонаторов и замедляющих систем;
- возрастание плотности тока в электронных пучках по законам моделирования до  $10^4 \text{ A/cm}^2$  и более, трудности отвода тепла при уменьшении геометрических размеров нагреваемых элементов;
- рост необходимого для фокусировки электронного пучка магнитного поля приводит к применению очень сильных магнитов ( $H \geq 10 \text{ кЭ}$ ).

Преодоление этих и ряда других трудностей было сложнейшей физической, инженерной и технологической задачей. Справиться с ними удалось до  $\lambda \approx 0,2$  мм.

Надо сказать, что с появлением полупроводниковых СВЧ-генераторов (лавинно-пролетных диодов, диодов Ганна, транзисторов и др.) начались исследования возможности и их продвижения в субмиллиметровый диапазон волн. Однако до настоящего времени трудности встретились непреодолимые — полупроводниковые генераторы работают лишь до короткой части миллиметрового диапазона волн. Исключением являются приборы с умножением частоты (использованием гармоник), но они практически непригодны для спектроскопии.

1.3. ЛОВ представляет собой генератор с длительным взаимодействием пучка электронов с электромагнитной волной. Электромагнитная волна в ЛОВ распространяется вдоль замедляющей системы, в которой фазовая скорость движения волны снижается приблизительно до скорости электронов, что обеспечивает возможность эффективного длительного взаимодействия электронов с полем волны в замедляющей системе. В ЛОВ направления групповой и фазовой скоростей электромагнитной волны противоположны (с этим связано их название — лампы обратной волны). В качестве замедляющей системы используются встречные штыри, спирали, гребенки и т.д. На рис. 2 показано устройство ЛОВ и дана схема, поясняющая принцип ее работы. Волна, распространяющаяся навстречу пучку (обратная волна), модулирует и группирует электроны, а образующиеся сгустки электронов наводят при своем движении электромагнитное поле в замедляющей системе и отдают ему свою энергию. При этом эффективно взаимодействуют с полем волны лишь электроны, движущиеся в непосредственной близости от замедляющей системы. Расстояние между электронным пучком и замедляющей

системой должно быть тем меньше, чем короче длина волн в свободном пространстве  $\lambda$  (выше  $v$ ) и чем больше замедление волны  $c/v_\phi$  ( $c$  — скорость света в свободном пространстве,  $v_\phi$  — фазовая скорость электромагнитной волны). Среди СВЧ-генераторов ЛОВ обладает наибольшим диапазоном электрической перестройки частоты. Диапазон перестройки может составлять октаву. Основная сложность — согласование вывода энергии в большом диапазоне частот. На рис. 1 показано перекрытие короткой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов разработанными ЛОВ, генерируемая мощность на коротковолновом участке не меньше  $10^{-4}$  Вт, в миллиметровой области она достигает сотен милливатт. В табл. 1 дана сводка



**Рис. 2.** Устройство субмиллиметровой ЛОВ и схема, поясняющая принцип ее работы: 1 — многоядерная замедляющая система с прецизионной периодической структурой, теплорассеивающими элементами, выводом энергии и оконечным поглотителем, обеспечивающая эффективное взаимодействие электронного пучка с высокочастотным электромагнитным полем; 2 — электронная пушка, формирующая ламинарный электронный пучок с удельной мощностью в единицы МВт/см<sup>2</sup> и плотностью тока в сотни А/см<sup>2</sup> в непрерывном режиме; 3 — герметичный широкополосный вывод энергии с малыми высокочастотными потерями; 4 — вакуумно-плотная металлокерамическая оболочка прибора с элементами токоподвода, юстировки и системой охлаждения

параметров ЛОВ. Следует отметить, что разработанная серия ЛОВ до сих пор не имеет аналогов в мире.

## 2. ЛОВ-СПЕКТРОСКОПИЯ

2.1. Создание достаточно мощных монохроматических перестраиваемых генераторов послужило основой освоения субмиллиметрового диапазона. Однако для спектроскопии одних генераторов мало. Необходимы дополнительные устройства, которые должны обеспечить канализацию излучения, возможность управления его амплитудой и фазой, определение его параметров, построение достаточно сложных измерительных систем и, наконец, высокочувствительное детектирование. В более длинноволновых СВЧ-диапазонах практически все перечисленные устройства базируются, как правило, на использовании волноводной техники. Из сказанного ранее ясно, что в субмиллиметровом диапазоне металлические волноводы становятся мало пригодными из-за возрастающих в них потерь и непомерно жестких требований к механическому изготовлению устройств очень малых размеров. Переход к сверхразмерным волноводам большого сечения нецелесообразен из-за появления большого числа типов колебаний, не позволяющих реализовать метрику и управление излучением. Возможности применения диэлектрических устройств крайне ограничены из-за значительных потерь в этих материалах на субмиллиметровых волнах. Поэтому основные проблемы пришлось решать, как в оптике, так называемыми квазиоптическими методами.

В трактах субмиллиметрового диапазона, как правило, целесообразен переход либо к распространяющемся в свободном пространстве пучку излучения, либо к пучку в полом диэлектрическом лучеводе, обеспечивающем одномодовое распространение электромагнитных волн за счет поглощения остальных типов волн в диэлектрике с потерями. При этом основным элементом, позволившим создать необходимую разнообразную квазиоптическую аппаратуру – от простейших поляризаторов, аттенюаторов и фазовращателей до сложных интерферометров, – стали одномерные вольфрамовые или золоченные проволочные сетки-решетки [2], натянутые на плоские металлические оправки с размерами  $a \gg \lambda > l > d$ , где  $\lambda$  – длина волны,  $a$  – диаметр оправки,  $l$  – период решетки, практически равный расстоянию между проволоками,  $d$  – диаметр проволоки.

Прохождение субмиллиметрового излучения через решетку с микронными размерами проволоки и периодом в десятки микрон зависит от направления вектора  $E$  волны относительно направления решетки; при  $E$ , параллельном проволокам, в них наводится ток и излучение не проходит сквозь решетку, при  $E$ , перпендикулярном проволокам, волна свободно проходит. Поворотом решетки вокруг оси, перпендикулярной к ее плоскости, можно изменить коэффициент отражения от 0,001 до 0,997 – это хорошее зеркало с переменными коэффициентами отражения и пропускания для плоскополяризованного излучения. Комбинации нескольких решеток в сочетании с фторопластовыми линзами и металлическими зеркалами и рупорами дают возможность построения всей необходимой квазиоптической аппаратуры.

В трактах субмиллиметрового диапазона, как правило, целесообразен переход либо к распространяющемся в свободном пространстве пучку излучения, либо к пучку в полом диэлектрическом лучеводе, обеспечивающем одномодовое распространение электромагнитных волн за счет поглощения остальных типов волн в диэлектрике с потерями. При этом основным элементом, позволившим создать необходимую разнообразную квазиоптическую аппаратуру – от простейших поляризаторов, аттенюаторов и фазовращателей до сложных интерферометров, – стали одномерные вольфрамовые или золоченные проволочные сетки-решетки [2], натянутые на плоские металлические оправки с размерами  $a \gg \lambda > l > d$ , где  $\lambda$  – длина волны,  $a$  – диаметр оправки,  $l$  – период решетки, практически равный расстоянию между проволоками,  $d$  – диаметр проволоки.

**Таблица 1.** Технические данные ЛОВ

Параметры	Пакетированные ЛОВ					Непакетированные ЛОВ	
	OB-69	OB-70	OB-71	OB-76	OB-86	OB-24	OB-30
Рабочий диапазон, ГГц	36–55	52–79	78,2–119	129–142,9	118–178	179–263	258–375
Выходная мощность (min), мВт	15–40	12–30	6–30	20–30	6–20	1–10	1–10
Перепад выходной мощности в диапазоне (max), дБ	8	8	8	5	8	13	13
Рабочее напряжение, кВ	0,4–1,2	0,5–1,5	0,5–1,5	1,1–1,5	0,5–1,5	1,0–4,0	1,0–4,0
Рабочий ток катода, мА	20–25	20–25	20–25	20–25	20–25	25–40	25–40
Фокусирующее магнитное поле, Э						6000	6000
Параметры	Непакетированные ЛОВ						
	OB-32	OB-80	OB-81	OB-82	OB-83	OB-84	OB-85
Рабочий диапазон, ГГц	370–535	526–714	667–857	789–968	882–1111	1034–1250	1153–1500
Выходная мощность (min), мВт	1–5	1–5	1–5	1–3	1–3	0,5–2	0,5–2
Перепад выходной мощности в диапазоне (max), дБ	13	13	13	13	13	13	13
Рабочее напряжение, кВ	1,0–5,0	1,5–6,0	1,5–6,0	1,5–6,0	1,5–6,0	1,5–6,0	1,5–6,0
Рабочий ток катода, мА	25–40	30–45	30–45	30–45	30–45	30–45	30–45
Фокусирующее магнитное поле, Э	9000	10 000	10 000	10 000	11 000	11 000	11 000

Детектирование излучения проводится оптикоакустическими преобразователями (ОАП), основанными на воздействии на мембрану переменного давления газа при поглощении им модулированного излучения, полупроводниковыми фоторезисторами (например, охлаждаемыми детекторами из антимонида индия  $n$ -InSb), либо полупроводниковыми или сверхпроводящими болометрами. В последнее время в быстродействующих устройствах начали применять электронные болометры, в которых регистрируется нагрев излучением не кристаллической решетки, а электронов в резистивном состоянии сверхпроводника [3]. Эти устройства столь мало инерционны, что позволяют вплоть до терагерцевого диапазона волн создавать высокочувствительные супергетеродинные приемники с промежуточными частотами, соответствующими гигагерцовому диапазону волн. Естественно, что в качестве гетеродинов в них перспективно использовать ЛОВ. Особый интерес для спектроскопии представляет возможность применения иногда для детектирования излучения изменения параметров самого исследуемого вещества, позволяющего реализовать балансные методы индикации (об этом речь пойдет ниже).

Для субмиллиметровой спектроскопии наибольший интерес представляют объекты, где характеристические частоты изучаемых процессов соответствуют квантам этого диапазона  $h\nu$ , где  $h$  – постоянная Планка. Среди них вращательные и вращательно-колебательные спектры молекул в газах; спектры поглощения в дипольных и неполярных жидкостях; спектральные и температурные зависимости вещественных и мнимых частей диэлектрической и магнитной проницаемостей – в твердых диэлектриках (включая сегнетоэлектрики и ферриты); спектры примесей, комплексов, резонансов и других объектов в полупроводниках. Наконец, субмиллиметровому диапазону волн соответствует энергетическая щель в большинстве сверхпроводниковых материалов.

В зависимости от целей важными оказываются те или иные особенности созданной аппаратуры:

- при измерении очень узких линий (газы, полупроводники) особо важны монохроматичность ЛОВ и перестройка частоты в широких пределах;
- при исследовании широких областей дисперсии вблизи фазовых переходов (сегнетоэлектрики, сверхпроводники) широкий диапазон перестройки генератора и большой динамический диапазон, то есть диапазон регистрируемых прибором изменений мощности;
- при изучении быстро протекающих во времени процессов (полупроводники, металлы) безынерционность перестройки частоты и возможность высокочастотной модуляции излучения.

Иногда необходимо сочетание ряда параметров (например, при исследовании сложных молекулярных спектров газов необходимы и высокое разре-

щение, и большой динамический диапазон, и широкий диапазон перестройки по частоте).

2.2. В связи с тем что субмиллиметровые ЛОВ-спектрометры и сейчас являются уникальными устройствами большой стоимости, а квазиоптическая аппаратура позволяет легко их видоизменять в зависимости от задач эксперимента, к настоящему времени практически не организован серийный выпуск универсальных приборов, а разработаны схемы, которые обеспечивают возможность измерения параметров веществ, находящихся в твердом, жидком и газообразном состояниях с необходимыми для исследуемых объектов разрешающей способностью и чувствительностью. В табл. 2 проводится сравнение характеристик ЛОВ-спектрометров с другими наиболее чувствительными спектрометрами тех же диапазонов. Видно, что ЛОВ-спектрометры на несколько порядков величины лучше. Кроме того, они могут применяться и тогда, когда фурье-спектрометры не могут быть использованы: для образцов с очень малыми коэффициентами пропускания, при сильно анизотропных образцах, для материалов с узкими резонансными линиями и т.д.

В одной статье невозможно сколько-нибудь подробно изложить совокупность полученных с помощью ЛОВ-спектроскопии результатов. Поэтому здесь ограничимся несколькими характерными примерами, где результаты представляются наиболее впечатляющими и без ЛОВ-спектрометров вообще не могли бы быть получены.

Первый пример посвящен измерению спектров газов [4], где при исследовании вращательных спектров полярных молекул и наиболее низкочастотных колебательных спектров молекул необходимо определение огромного числа узких линий, интенсивность которых может отличаться на много порядков.

В стандартной схеме, где при регистрации по обычной методике, основанной на измерении поглощения газом излучения, из-за сравнительно малых коэффициентов поглощения полезный сигнал наблюдался бы на большом фоне, вызванном нерезонансным излучением. Влияние помех растет с увеличением мощности генератора, а значительная мощность необходима для получения достаточного резонансного поглощения. Это противоречие снимается, если регистрировать не изменение прошедшего через исследуемый газ излучения, а изменение параметров вещества под действием достаточно мощного перестраиваемого по частоте монохроматического излучения, например использовать изменение давления при нагревании газа поглощенным излучением. Схема спектрометра с таким "радиоакустическим" детектором приведена на рис. 3. В нем излучение ЛОВ модулируется звуковой частотой и медленно сканируется по частотному диапазону. В газовой ячейке помещается чувствительный микрофон. При частотах ЛОВ, соответствующих линиям поглощения, газ нагревается и в нем с частотой модуляции изменяется давление. Эти изменения

**Таблица 2.** Сравнение характеристик ЛОВ-спектрометров с характеристиками фурье-спектрометров

Основная характеристика	Диапазон длин волн			
	2–1 мм		1–0,2 мм	
	ЛОВ-спектрометр	фурье-спектрометр	ЛОВ-спектрометр	фурье-спектрометр
Разрешающая способность	$10^5$	100–200	$10^5$	200–1000
Динамический диапазон изменения регистрируемого сигнала		2–10		10–100
конденсированные среды	$10^6$		$10^5$	
газы	$10^7$		$10^7$	
Погрешность определения абсолютного значения частоты		$10^{-3}–10^{-2}$		$10^{-3}–10^{-2}$
конденсированные среды	$5 \cdot 10^{-5}$		$5 \cdot 10^{-4}$	
газы	$10^{-8}$		$10^{-8}$	

регистрируются микрофоном. Такой спектрометр при мощности ЛОВ 10 мВт имеет чувствительность  $10^{-8}$  см<sup>-1</sup>, разрешающую способность  $10^5$ – $10^6$  и способен регистрировать около миллиона линий. На рис. 3 приведен образец записи спектров аммиака NH<sub>3</sub> и сернистого газа SO<sub>2</sub> (здесь регистрировали производные линий), иллюстрирующий возможность одновременно записывать с помощью радиоакустического детектора различные спектры при помещении на пути луча нескольких газовых ячеек с микрофонами для получения наряду с исследуемым и опорного спектра. Описанный способ индикации является уже упоминавшимся балансным, или нулевым, методом: при отсутствии полезного сигнала отклик спектрометра равен нулю, так как при этом регистрируется не изменение прошедшей к детектору мощности, а изменение параметров исследуемого вещества.

Второй пример характеризует возможности широкого диапазона перестройки и большого динамического диапазона ЛОВ-спектрометра при изучении твердых диэлектриков.

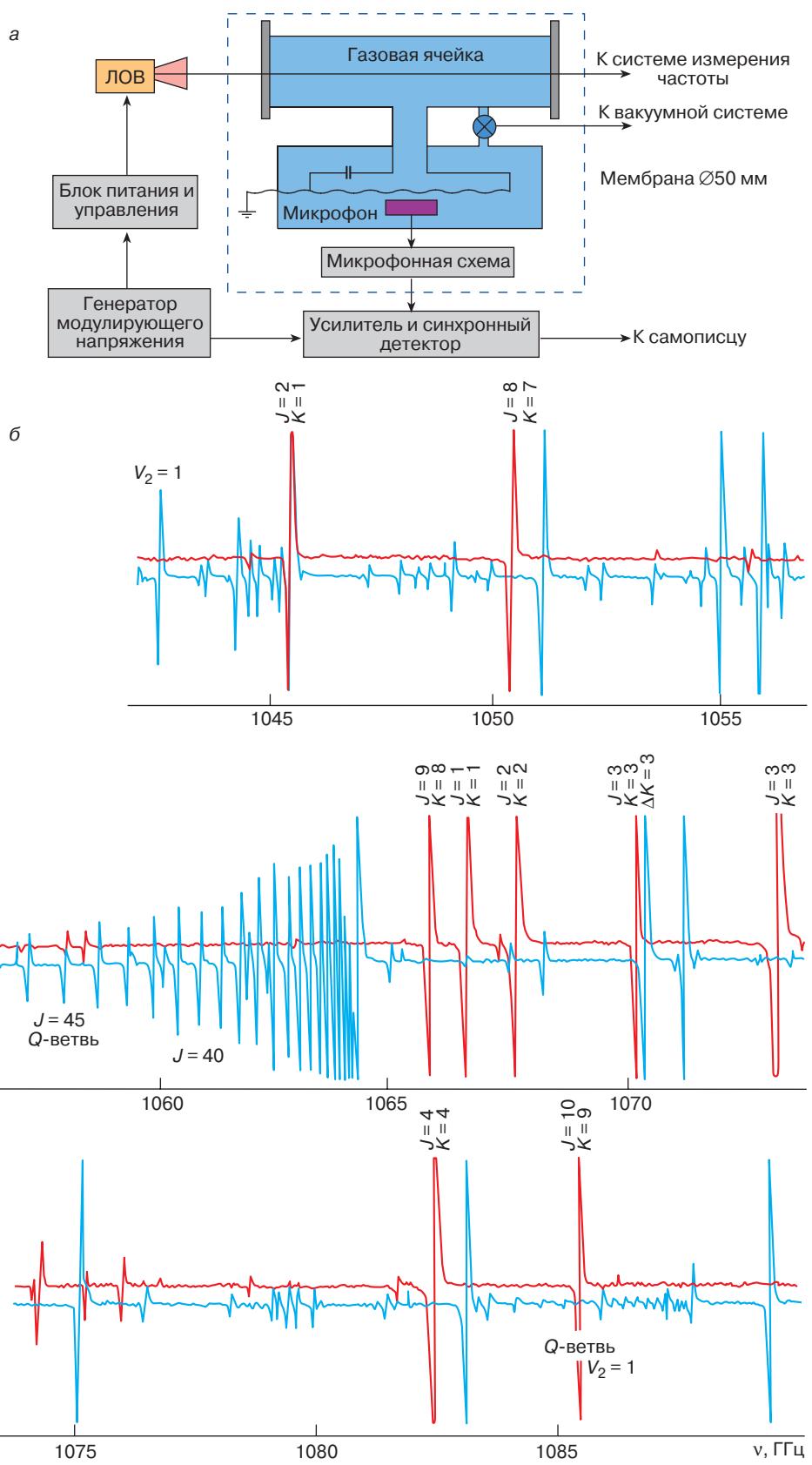
На рис. 4 [4] приведена температурная зависимость действительной  $\epsilon'$  и мнимой  $\epsilon''$  частей диэлектрической проницаемости кристалла гидрофосфата свинца PbHPO<sub>4</sub> в области частот и температур, соответствующих фазовому переходу из параэлектрического в сегнетоэлектрическое состояние. Коллективные возбуждения молекул, в результате которых и возникает сегнетоэлектрическое состояние, сопровождаются появлением у анизотропного кристалла аномально высоких значений показателя преломления (10–100) и поглощения (100 см<sup>-1</sup>), что делает его исключительно сложным объектом даже для ЛОВ-спектроскопии и практически недоступным для фурье-спектрометров.

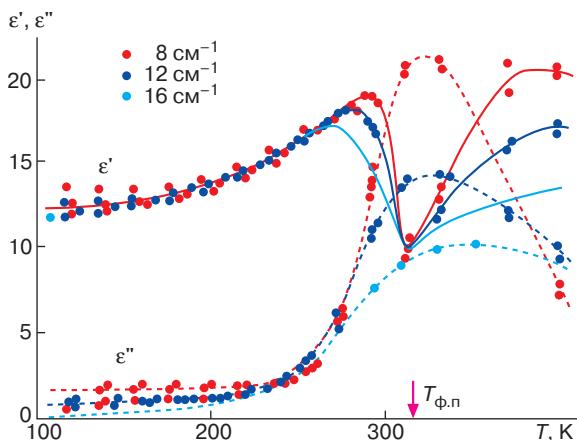
Последний пример приведем из области исследования сверхпроводников. Для спектроскопии сверхпроводников субмиллиметровые волны используются уже давно, но из-за недостаточного разрешения, малой чувствительности и динамического

диапазона обычных спектрометров в последние годы этот метод почти не применяется. Его заменила тунNELьная спектроскопия. Однако с ее помощью удается получить информацию, по-видимому, лишь о слое сверхпроводника, непосредственно прилегающем к туннельному контакту. Развитие ЛОВ-спектроскопии кардинально меняет ситуацию. Значительный динамический диапазон ЛОВ-спектрометра позволяет не только измерять спектры достаточно толстых образцов, но и изучать нелинейные эффекты в сверхпроводниках. Разработанные методики позволяют изучать как пропускание  $T_i$  и отражение  $R$ , так и поглощение  $A$  излучения. Объектами исследования могут быть объемные образцы и пленки с различными параметрами (толщиной, покрытием, подложкой). Более того, в рамках одного эксперимента можно определить сразу две характеристики образца ( $T_i$ ,  $R$  или  $A$ ,  $R$ ) и их зависимости от температуры, магнитного поля, мощности излучения. Измерения могут включать исследование кинетических характеристик.

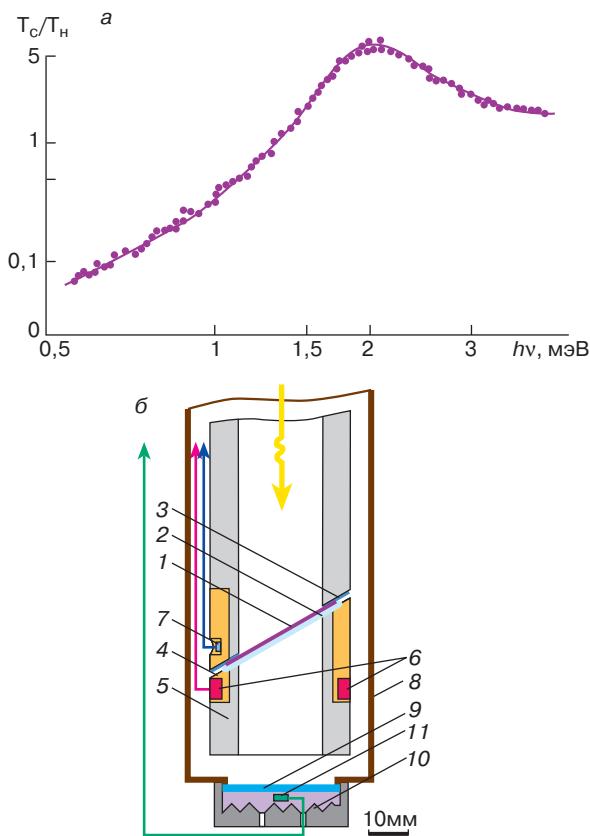
Приведем результаты одного из экспериментов. В нем измерены спектры пропускания пленок ванадия V, ниobia Nb и нитрида ниobia NbN толщиной от 75 до 3000 Å на ЛОВ-спектрометре, в котором детектор из n-InSb помещался за исследуемым образцом. Образец в гелиевом криостате нагревался до температуры сверхпроводящего перехода и изменялся его спектр пропускания в нормальном состоянии  $T_h(v)$ , затем температура понижалась, и спектр измерялся в сверхпроводящем состоянии  $T_c(v)$ . На рис. 5 приведен спектр отношения  $T_c/T_h(v)$  для образца ванадия V толщиной 300 Å, из которого может быть определено значение энергии щели и некоторые другие параметры сверхпроводника.

Особенностью этого эксперимента является реализация динамического диапазона спектрометра до  $10^9$  (для измерения пропускания достаточно толстых сверхпроводящих пленок) при эффективном подавлении паразитных резонансов в тракте несмотря на очень высокий коэффициент отражения





**Рис. 4.** Температурная зависимость действительной  $\epsilon'$  и мнимой  $\epsilon''$  частей диэлектрической проницаемости  $\text{PbHPO}_4$  в сегнетоэлектрической и параэлектрической областях. Стрелкой отмечена температура фазового перехода  $T_{\phi,\text{п}}$ .



**Рис. 5.** Спектр отношения  $T_c/T_n(v)$  для образца ванадия толщиной 300 Å (а) и конструкция камеры со сверхпроводящим образцом и детектором (б)

сверхпроводящей пленки. Для этого образец (рис. 5), представляющий собой пленку исследуемого материала 1 на диэлектрической подложке 2, зажимается с прокладками 3 из индия In в латунную обойму 4 и располагается в квазиоптическом тракте с поглощающими стенками 5 так, чтобы перекрыть все сечение лучевода ( $\varnothing 20$  мм) и чтобы угол между осью тракта и нормалью к пленке составлял  $\sim 20^\circ$ . Снаружи обоймы наматывается нагреватель 6 и прикрепляется термометр 7. Лучевод с образцом помещается в вакуумный чехол 8 из нержавеющей стали с кварцевым окном 9, за которым непосредственно в жидкому гелию перед согласованной нагрузкой 10 располагается детектор 11 из n-InSb. Поглощение излучения, отраженного от неоднородностей в тракте, и прежде всего от исследуемого образца, происходит в стенках тракта, а вакуумное индивидуальное уплотнение полностью устраняет огибание излучением образца.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очевидно, что рассмотренными вопросами проблема применений и перспектив субмиллиметровой ЛОВ-спектроскопии ни в коей мере не исчерпывается. Особое значение для ее широкого внедрения в практику имеют дальнейшее совершенствование аппаратуры, основанной на использовании ЛОВ, выпуск разнообразного ассортимента измерительных и управляющих квазиоптических устройств субмиллиметрового диапазона волн, а также дальнейшая автоматизация измерений.

### ЛИТЕРАТУРА

- Гершензон Е.М., Голант М.Б., Негирев А.А., Савельев К.С. Лампы обратной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн / Под ред. Н.Д. Девяткова. М.: Радио и связь, 1985. 135 с.
- Ирисова Н.А. Метрика субмиллиметровых волн // Вестник АН СССР. 1968. № 10. С. 63–71.
- Гольцман Г.Н. Горячие электроны в резистивном состоянии сверхпроводника – новое физическое явление, новая техника в электронике, радиофизике и оптике // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 4. С. 90–96.
- Крупнов А.Ф. Субмиллиметровая микроволновая спектроскопия газов // Вестник АН СССР. 1978. № 7. С. 18–24.
- Козлов Г.В. и др. Дальнняя инфракрасная и субмиллиметровая диэлектрическая дисперсия в сегнетоэлектриках  $\text{PbHPO}_4$  и  $\text{PbHAIO}_4$  // Сегнетоэлектричество. 1978. Т. 21. С. 387–389.

\* \* \*

Евгений Михайлович Гершензон, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой Московского государственного педагогического университета, член-корреспондент РАО, лауреат Государственной премии СССР. Автор более 400 научных работ, монографий, учебников.