

## Влияние толщины диэлектрической подложки на поглощающие и просветляющие свойства ультратонких пленок меди

© В.Г. Андреев<sup>1</sup>, В.А. Вдовин<sup>2</sup>, П.С. Глазунов<sup>1</sup>, И.И. Пятайкин<sup>2</sup>, Ю.В. Пинаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009 Москва, Россия

e-mail: andreev@acs366.phys.msu.ru

Поступила в редакцию 14.04.2022 г.

В окончательной редакции 14.04.2022 г.

Принята к публикации 25.05.2022 г.

Изучена зависимость оптических коэффициентов ультратонких пленок меди толщиной 2–30 нм от толщины подложек. Пленки изготавливались на кварцевых подложках толщиной 4 мм, а толщина подложек (6 и 8 мм) варьировалась путем плотного прижатия чистых подложек с толщинами 2 и 4 мм к 4-мм подложке с пленкой. Измерения проведены в волноводе в диапазоне частот 8.5–12.5 GHz на моде TE<sub>10</sub> для двух ориентаций пленки по отношению к направлению падающей волны. Зависимости оптических коэффициентов, измеренные при падении волны со стороны пленки и со стороны подложки, существенно отличаются. Показано, что эффект аномально высокого поглощения волн (более 77%) пленками меди толщиной не более 10 нм наблюдается в широкой полосе частот. Максимальное поглощение (77.5%) зарегистрировано на частоте 8.5 GHz при падении волны на пленку толщиной 8.6 нм со стороны 6-мм подложки. Впервые зарегистрирован эффект экстремально малого отражения (0.06%) при падении волны частоты 11.54 GHz на пленку толщиной 7.9 нм со стороны 4-мм подложки. Показано, что частотный диапазон, где наблюдался эффект минимального отражения, превышает полосу просветления диэлектрической пластины с полуволновым резонансом.

**Ключевые слова:** ультратонкие пленки меди, кварцевая подложка, оптические коэффициенты, волноводные измерения, СВЧ диапазон.

DOI: 10.21883/OS.2022.09.53304.3539-22

### Введение

Металлические пленки толщиной в несколько нанометров способны эффективно поглощать электромагнитное излучение СВЧ диапазона [1]. В обзоре [2] теоретически показано, что максимальный коэффициент поглощения ультратонкой металлической пленки без подложки составляет 50%. Наличие диэлектрической подложки оказывает существенное влияние на оптические коэффициенты ультратонких пленок. Это проявляется прежде всего в заметном отличии зависимостей оптических коэффициентов, измеряемых при падении волны непосредственно на пленку, и при падении волны на пленку со стороны подложки. На этот эффект обращалось внимание в наших более ранних работах. Максимальный коэффициент поглощения пленок меди [1] на 2-мм кварцевой подложке не превышал 0.25 в случае падения волны со стороны пленки. Однако при падении волны со стороны 2-мм подложки на пленку платины с аналогичными параметрами коэффициент поглощения возрастал до 0.45 [3]. Эти эффекты наблюдались для пленок толщиной в несколько нанометров. Следует ожидать усиления влияния подложек, толщина которых составляет четверть или половину длины волны на некоторой частоте в измеряемом диапазоне.

Ультратонкие металлические пленки на прозрачных подложках рассматриваются как возможная альтернатива оксида индия-олова для изготовления прозрачных электродов жидкокристаллических экранов, органических светодиодов и сенсорных экранов. В [4] сообщается о создании гибкого электрода на основе серебряно-медной пленки толщиной 6.5 нм, заключенной между двумя диэлектрическими слоями прозрачного полимера с абсолютным коэффициентом пропускания ~ 88.4%, что даже выше, чем коэффициент пропускания ~ 88.1% полимерной подложки. Особенный интерес к тонкопленочным поглотителям СВЧ излучения возник в связи с планируемым внедрением технологии 5G, где передача данных происходит в диапазонах частот 2.3–4.7 GHz и 24–54 GHz. С целью защиты операторов и чувствительных устройств от влияния электромагнитных помех предлагается использовать оптически прозрачные покрытия с достаточным большим поглощением СВЧ излучения в широкой полосе. Разрабатываются покрытия на основе высокоаморфных нанометровых пленок пиролитического углерода (PyC), состоящих из беспорядочно ориентированных и переплетенных чешуек графена с типичным размером в несколько нанометров. Такие покрытия поглощают до 38% падающего излучения [5]. В устройстве, основанном на асимметричном резонаторе

Фабри-Перо, в качестве поглотителя СВЧ излучения используются монослой графена и прозрачный ультратонкий (8 nm) слой легированного серебра [6]. Подстройка пика поглощения осуществляется путем подбора толщины слоя плавленого кварца, расположенного между слоями графена и серебра.

Целью настоящей работы являлось изучение зависимости оптических коэффициентов ультратонких пленок меди от толщины кварцевых подложек и демонстрация возможности создания покрытий, обладающих высоким уровнем поглощения и минимальным отражением СВЧ волн в широкой полосе частот. При этом подложки выбирались так, чтобы их толщина составляла четверть или половину длины волны на определенных частотах в измеряемом диапазоне. Пленки меди толщиной в несколько нанометров достаточно прозрачны в видимой области, поэтому такие покрытия могут служить основой для создания экранов для защиты от электромагнитных помех.

## Материалы и методы

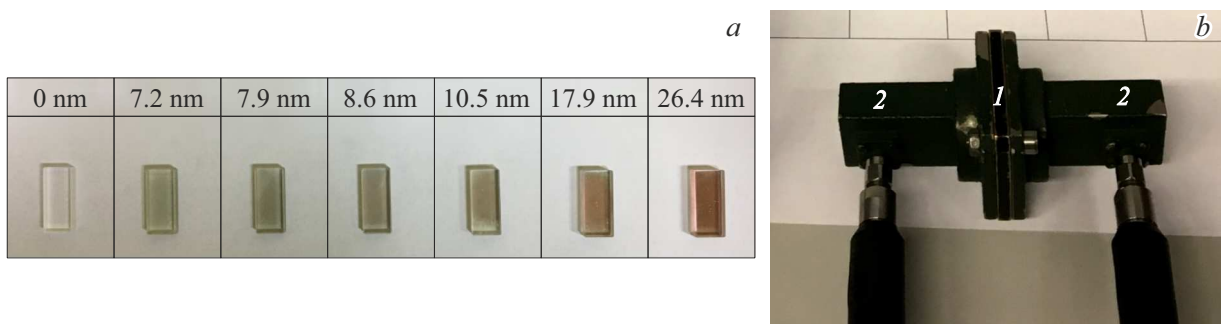
Пленки меди напылялись в вакуумной установке со значением предварительного вакуума не хуже  $5 \cdot 10^{-6}$  mm Hg методом термического испарения. Напыление производилось на поверхность тщательно очищенных физико-химическими методами подложек толщиной 4 mm и размерами  $22.9 \times 9.8$  mm, отполированных до шероховатости оптического класса. Все подложки были изготовлены из оптического кварцевого стекла марки КУ-1. Перед напылением пленок подложки отжигались в вакууме  $10^{-6}$  mm Hg при температуре около  $250^\circ\text{C}$ , после чего охлаждались до комнатной температуры, при которой проводилось напыление пленок. Навеска из меди чистотой 99.999% известной массы закладывалась в вольфрамовый тигель и нагревалась до температуры плавления. Время испарения навески не превышало 10 с. При такой скорости напыления уменьшался размер островков, которые формируются на поверхности подложки на начальном этапе испарения металла [7]. Тигель устанавливался на расстоянии 10 cm от поверхности подложки, что позволяло получать пленки достаточно равномерной толщины. Толщина пленки рассчитывалась по массе навески с учетом взаимного расположения подложки и тигля. Для получения пленки толщиной 1.0 nm необходимо брать навеску массой 1.24 mg. Это соотношение было получено путем измерения толщины пленок, полученных при испарении навески известной массы с использованием стилусного профилометра KLA-Tencor Alpha-Step IQ. Для этого напылялись пленки толщиной от 10 до 20 nm, и на их поверхности методом литографии изготавливались полоски с четкой ступенькой перехода от подложки к пленке. Погрешность определения толщины пленки таким методом составляла 5%. В измерениях оптических коэффициентов использовались пленки толщиной 4.0, 4.8, 5.8, 7.2, 7.9, 8.6, 10.5, 17.9,

26.4 nm. Пленки, для которых измеренные оптические коэффициенты отличались от коэффициентов для чистой подложки, показаны на рис. 1, *a*. Измерения оптических коэффициентов ультратонких пленок меди проводились в тракте прямоугольного волновода в диапазоне частот 8.5–12.5 GHz для двух ориентаций пленки по отношению к направлению падающей волны (рис. 1, *b*). При fq (film-quartz)-ориентации волна падала непосредственно на поверхность пленки, а при qf (quartz-film)-ориентации волна падала на пленку после прохождения через кварцевую подложку. Схема измерений выполнена абсолютно симметричной по отношению к каналам векторного анализатора: держатель подложки с пленкой помещался между двух коаксиально-волноводных переходов (КВП), которые подключались к каналам 1 и 2 векторного анализатора цепей ZVA-24. Когда пленка находилась со стороны канала 1, то измеряемые амплитудные параметры рассеяния  $S_{11}$  и  $S_{12}$  соответствовали амплитудным коэффициентам отражения и прохождения для fq-ориентации, а  $S_{22}$  и  $S_{21}$  — амплитудным коэффициентам отражения и прохождения для qf-ориентации. Калибровка измерительного тракта проводилась в режиме полного отражения, когда на место держателя подложки устанавливалась полированная медная пластина, полностью отражающая СВЧ излучение, и в режиме полного прохождения при установке держателя без подложки, т.е. в отсутствие в тракте каких-либо неоднородностей. Такая калибровка обеспечивала хорошее соответствие измеренных и рассчитанных значений амплитуды и фазы оптических коэффициентов чистых кварцевых подложек. Энергетические коэффициенты отражения  $R$ , пропускания  $T$  и поглощения  $A$  вычислялись по формулам:

$$R_{fq} = S_{11}^2, R_{qf} = S_{22}^2, T_{fq} = S_{12}^2, T_{qf} = S_{21}^2,$$

$$A_{fq} = 1 - R_{fq} - T_{fq}, A_{qf} = 1 - R_{qf} - T_{qf}. \quad (1)$$

Фазы оптических коэффициентов для соответствующих ориентаций соответствовали измеряемым фазам параметров рассеяния  $S_{ij}$ . Для измерения зависимостей оптических коэффициентов пленок меди от толщины подложки было предложено напылять пленки на подложки только одной толщины, в нашем случае были выбраны подложки толщиной 4 mm. Толщина подложки варьировалась путем плотного прижатия к 4-mm подложке с пленкой чистой подложки со стороны, где пленка отсутствовала. В нашем распоряжении были подложки толщиной 2 и 4 mm, в результате чего были проведены измерения как с подложкой 4 mm, так и с их комбинациями  $4 + 2 = 6$  mm и  $4 + 4 = 8$  mm. Преимущество предложенной методики состояло в использовании одних и тех же пленок, поскольку напылить совершенно идентичные пленки нанометровой толщины довольно затруднительно. Для подтверждения правомерности использования такой методики были проведены измерения коэффициентов отражения и пропускания чистой подложки толщиной 4 mm и комбинации из двух 2-mm подложек, которые совпали в пределах 2%.



**Рис. 1.** Фото пленок меди различной толщины на подложках (а) и волноводной части экспериментальной установки (b): 1 — держатель измеряемой пленки, 2 — коаксиально-волноводные переходы (КВП).

## Результаты измерений

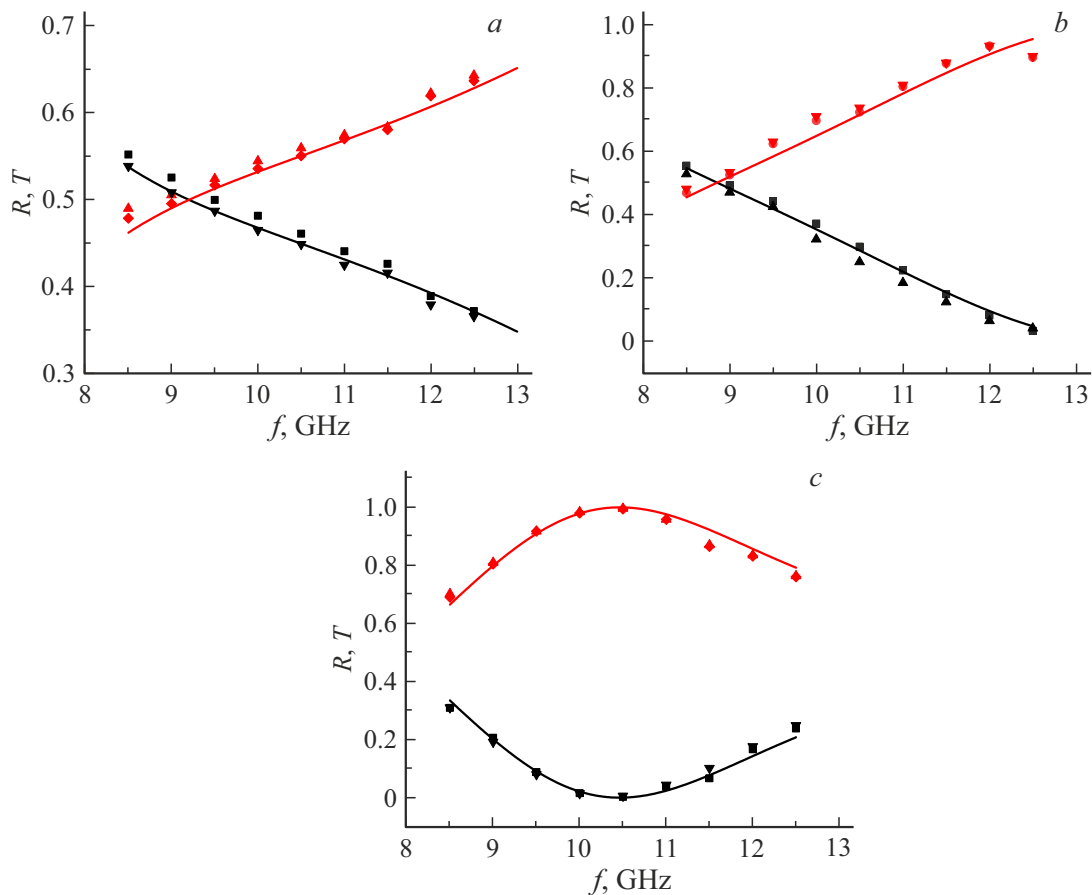
### Измерения оптических коэффициентов чистых подложек и экспериментальное определение диэлектрической проницаемости кварцевого стекла

На первом этапе были проведены тестовые измерения коэффициентов отражения и пропускания чистых подложек в диапазоне частот 8.5–12.5 GHz. В измерениях использовались подложки толщиной 2 и 4 mm, а также их комбинации 4 + 2 mm и 4 + 4 mm, когда в оправку вставлялась пара плотно прижатых друг к другу подложек. Поскольку схема измерений симметрична по отношению к каналам 1 и 2, то коэффициенты отражения при падении волны со стороны канала 1 ( $R_{11}$ ) и со стороны канала 2 ( $R_{22}$ ) практически совпадают (рис. 2). Аналогичное утверждение справедливо и для коэффициентов пропускания  $T_{12}$  и  $T_{21}$ . Измеренные значения оптических коэффициентов сравнивались с результатами расчетов по известным формулам [8] с учетом волноводного распространения. Диэлектрическая проницаемость кварцевого стекла  $\epsilon$  варьировались так, чтобы среднеквадратичное отклонение рассчитанных значений оптических коэффициентов было минимальным для всех комбинаций подложек. Было получено значение  $\epsilon = 3.6$ , что немного отличается от значения ( $\epsilon = 3.8$ ), приведенного в [9]. Подложка толщиной 8 mm (при  $\epsilon = 3.6$ ) является полуволновой на частоте 10.46 GHz, поэтому на указанной частоте наблюдается минимум отражения, а коэффициент пропускания равен 1 (рис. 2, b). Хорошее соответствие во всем измеряемом диапазоне частот измеренных и рассчитанных значений оптических коэффициентов чистых подложек и их комбинаций показало, что калибровка измерительного тракта выполнена достаточно аккуратно, а также еще раз продемонстрировало правомерность использования комбинаций подложек для вариации их толщин. В дальнейшем полученное значение  $\epsilon$  планируется использовать для численных расчетов комплексных оптических коэффициентов пленок меди на подложках.

### Измерения оптических коэффициентов пленок меди на подложках различной толщины

На рис. 3, а приведены зависимости оптических коэффициентов  $R$ ,  $T$  и  $A$  пленки толщиной 7.9 nm на 4-mm подложке от частоты, измеренные при падении волны как со стороны пленки (fq), так и со стороны кварцевой подложки (qf). Коэффициенты пропускания, в силу симметрии схемы измерений, совпадают и практически не зависят от частоты, оставаясь примерно на уровне 0.2–0.26. Коэффициент отражения  $R_{fq}$  монотонно уменьшается от 0.7 ( $f = 8.5$  GHz) до 0.53 ( $f = 12.5$  GHz), а коэффициент поглощения  $A_{fq}$  соответственно плавно возрастает от 0.11 ( $f = 8.5$  GHz) до 0.21 ( $f = 12.5$  GHz). Коэффициент отражения в случае падения волны со стороны 4-mm подложки убывает от значения 0.24, достигает практически нуля ( $6.8 \cdot 10^{-4}$ ) на частоте 11.54 GHz, а затем увеличивается до 0.02 ( $f = 12.5$  GHz). Коэффициент поглощения  $A_{qf}$  возрастает от 0.56 ( $f = 8.5$  GHz), достигает максимума 0.73 ( $f = 11.54$  GHz) и уменьшается до 0.72 на краю диапазона ( $f = 12.5$  GHz). Диапазон частот, где наблюдается максимум поглощения  $A_{qf} > 0.72$  и минимум отражения  $R_{qf} < 0.03$ , составляет около 2 GHz.

Зависимости коэффициентов  $R_{qf}$ ,  $T_{qf}$  и  $A_{qf}$  от толщины пленки на 4-mm подложке, измеренные на частоте 11.5 GHz, приведены на рис. 3, б. У пленок толщиной до 6 nm сплошной металлический слой еще не сформировался, и их оптические коэффициенты практически не отличаются от значений, измеренных для чистой подложки. В наших измерениях минимальная толщина, при которой пленки начинали проявлять металлические свойства, составила 7.2 nm. На участке 7.2–7.9 nm наблюдается резкое уменьшение  $R_{qf}$ , после чего начинается область толщин, при которых отражение растет, а пропускание уменьшается. Для пленок толщиной более 18 nm коэффициенты  $R_{qf}$ ,  $T_{qf}$  выходят на примерно постоянный уровень. Коэффициент поглощения имеет максимум  $A_{qf} = 0.76$  для пленки толщиной 8.6 nm, после чего уменьшается и выходит примерно на постоянный уровень для пленок толщиной более 18 nm. При падении волны со стороны пленки зависимости оптических



**Рис. 2.** Коэффициенты отражения  $R_{11}$  (■),  $R_{22}$  (▼) и коэффициенты пропускания  $T_{12}$  (◆),  $T_{21}$  (▲), измеренные для подложек толщиной 4 mm (a), 6 mm (комбинация 4 + 2 mm) (b) и 8 mm (4 + 4 mm) (b). Линиями показаны коэффициенты отражения и пропускания, рассчитанные для значения  $\epsilon = 3.6$ .

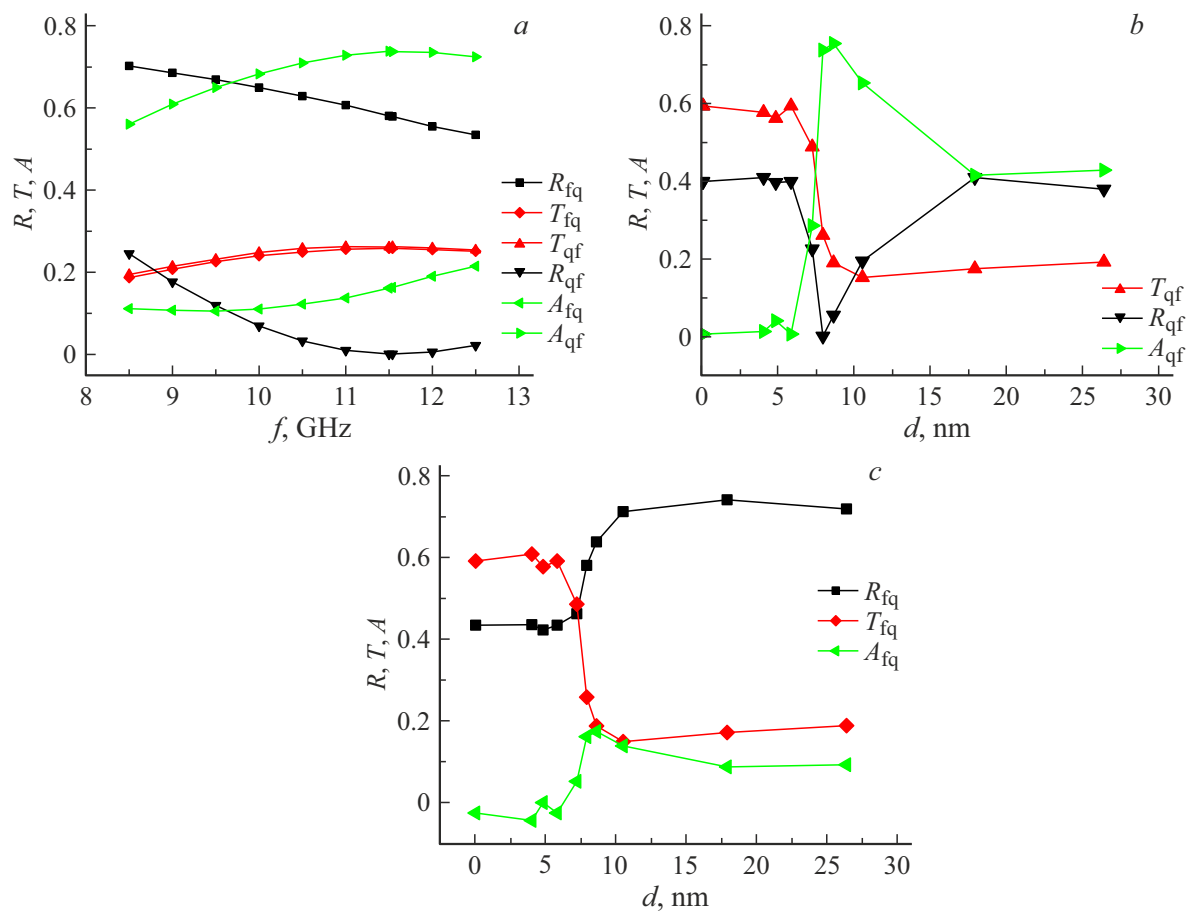
коэффициентов от толщины каких-либо особенностей не имеют (рис. 3, c). Коэффициент поглощения имеет слабо выраженный максимум ( $A_{fq} = 0.17$ ) при толщине пленки 8.6 nm.

Увеличение толщины подложки до 6 mm (4 + 2) приводит к заметному изменению оптических коэффициентов (рис. 4, a, b). Коэффициенты пропускания ( $T_{qf} \approx T_{fq}$ ) пленки толщиной 8.6 nm с ростом частоты монотонно уменьшаются от значения  $T_{qf} = 0.22$  ( $f = 8.5$  GHz) до 0.09 ( $f = 12.5$  GHz). Коэффициент отражения  $R_{fq}$  меняется в пределах, не превышающих 20% ( $0.53 < R_{fq} < 0.62$ ). Коэффициент отражения при падении волны со стороны подложки  $R_{qf}$  имеет минимум  $6.4 \cdot 10^{-3}$  на краю диапазона ( $f = 8.5$  GHz), затем он быстро растет и на частоте 12.5 GHz сравнивается с  $R_{fq}$ . Коэффициент поглощения  $A_{qf}$  на частоте  $f = 8.5$  GHz имеет значение 0.775, что является абсолютным максимумом для поглощения, зарегистрированного во всех наших измерениях. С ростом частоты  $A_{qf}$  уменьшается, и на частоте  $f = 12.5$  GHz он сравнивается с  $A_{fq}$ . На рис. 4, b показаны зависимости коэффициентов  $R_{qf}$ ,  $T_{qf}$  и  $A_{qf}$  от толщины пленки на 6-mm подложке, измеренные на частоте 8.5 GHz. На этой частоте наблюда-

лся минимум отражения ( $R_{qf} = 6.4 \cdot 10^{-3}$ ) и максимум поглощения ( $A_{qf} = 0.775$ ) для пленки 8.6 nm. Характер зависимостей оптических коэффициентов от толщины пленки на подложках 4 и 6 mm практически идентичен (рис. 3, b и 4, b). Небольшие отличия коэффициентов для пленок на 6-mm подложках наблюдаются в числовых значениях и в отсутствии стабилизации коэффициентов  $R_{qf}$ ,  $T_{qf}$  для пленок толщиной более 18 nm.

Минимальное значение коэффициента отражения ( $R_{qf} = 0.08$ ) для пленок на 8-mm подложке наблюдалось на частоте 10.5 GHz при толщине пленки 8.6 nm при падении волны со стороны подложки (рис. 5, a). Эта частота находится вблизи полуволнового резонанса (10.46 GHz) для чистой 8-mm подложки. Измеренное значение коэффициента отражения чистой подложки на этой частоте составляло  $2.5 \cdot 10^{-3}$ .

Особенностью пленки 8.6 nm на 8-mm подложке является небольшое отличие коэффициентов отражения при падении волны как со стороны пленки  $R_{fq}$ , так и со стороны подложки  $R_{qf}$ , а также их относительно небольшая величина во всем диапазоне измеряемых частот. Максимальный коэффициент поглощения ( $A_{fq} = 0.54$ ) был зарегистрирован на частоте 12.5 GHz



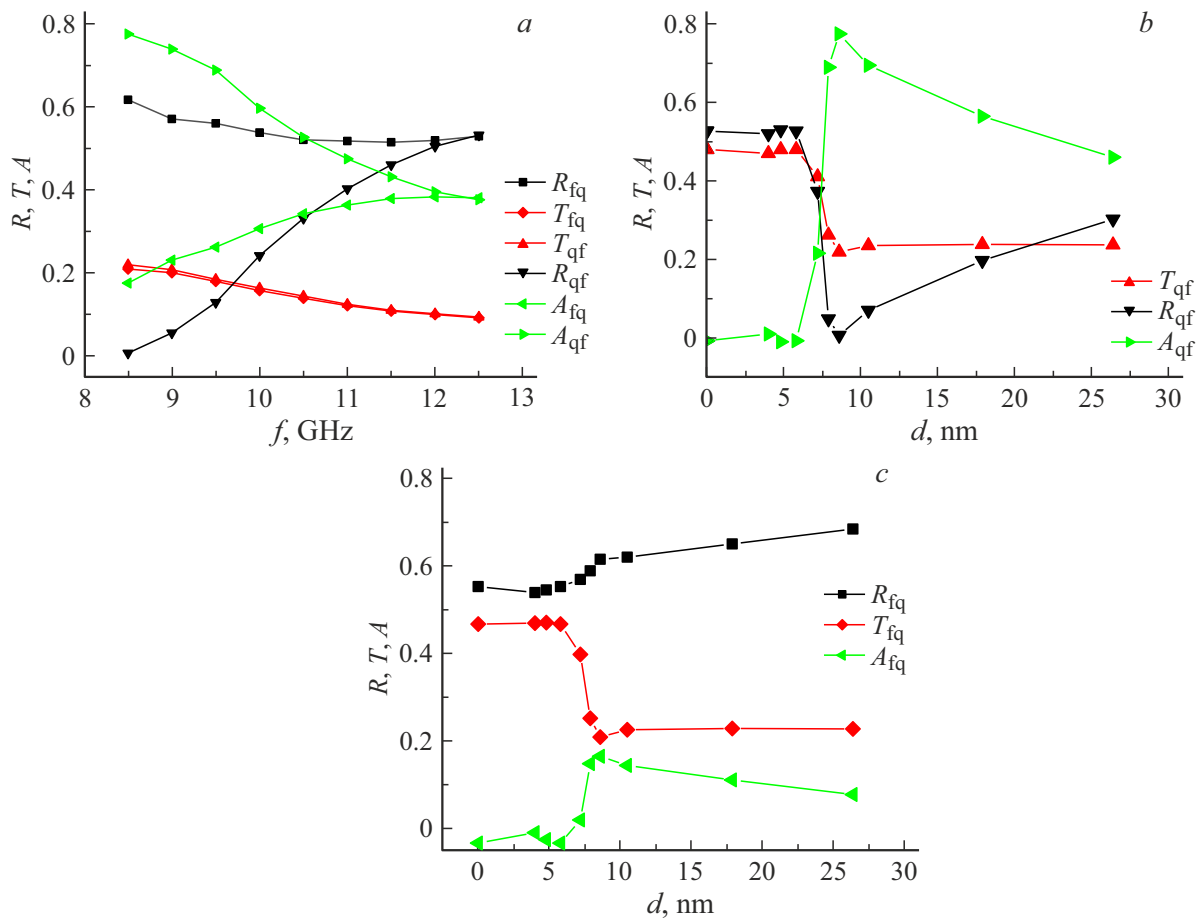
**Рис. 3.** Зависимости оптических коэффициентов пленки 7.9 nm на 4-mm подложке от частоты, измеренные при падении волны со стороны пленки ( $R_{fq}$  (■),  $T_{fq}$  (◆),  $A_{fq}$  (◄)) и со стороны кварцевой подложки ( $R_{qf}$  (▼),  $T_{qf}$  (▲),  $A_{qf}$  (►)) (a). Зависимости коэффициентов  $R_{qf}$  (▼),  $T_{qf}$  (▲),  $A_{qf}$  (►) (b) и  $R_{fq}$  (■),  $T_{fq}$  (◆),  $A_{fq}$  (◄) (c) от толщины пленки  $d$  на 4-mm подложке, измеренные на частоте 11.5 GHz. Символы соединены линиями для наглядности.

при падении волны на пленку толщиной 8.6 nm. На частоте 10.5 GHz (рис. 5, b) для пленок, толщина которых превышает 8.6 nm, коэффициент отражения максимален ( $R_{qf} \approx R_{fq} \approx 0.8$ ), коэффициент пропускания минимален ( $T_{qf} \approx T_{fq} \approx 0.06$ ), а коэффициент поглощения не превышает 0.2. Отметим, что зависимости коэффициентов от толщины пленки на указанной частоте практически идентичны как при падении волны со стороны пленки, так и со стороны подложки.

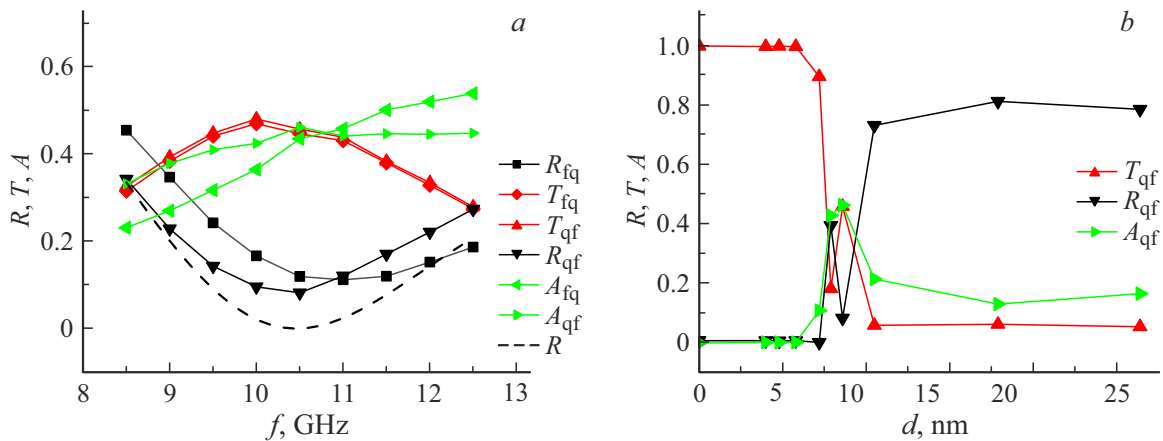
## Заключение

Экспериментально показано, что эффект аномально высокого поглощения волн СВЧ диапазона ультратонкими металлическими пленками наблюдается в широкой полосе частот. Максимальное поглощение ( $A_{qf} = 0.775$ ) зарегистрировано на частоте 8.5 GHz в пленке толщиной 8.6 nm, напыленной на 6-mm подложке. Немного меньшее поглощение ( $A_{qf} = 0.74$ ) было измерено в пленке толщиной 7.9 nm на 4-mm подложке на частоте 11.5 GHz. При этом коэффициент поглощения

этой пленки практически не зависит от частоты во всей измеряемой полосе 8.5–12.5 GHz и составляет в среднем 0.6. Отметим, что эффект существенно зависит от ориентации пленки по отношению к падающему излучению. Указанные выше значения поглощения были получены при падении волны на пленку со стороны подложки. Для подложки толщиной 8 mm максимальный коэффициент поглощения ( $A_{fq} = 0.54$ ) был зарегистрирован на частоте 12.5 GHz при непосредственном падении волны на пленку толщиной 8.6 nm. Наличие ультратонких металлических пленок существенно влияет на коэффициент отражения излучения, при этом частотная полоса такого просветляющего эффекта может быть шире, чем у полуволновой диэлектрической пластины. Следует особо подчеркнуть, что высокий уровень поглощения (коэффициент  $A_{qf}$ ) пленок толщиной 7.9 и 8.6 nm на 4-mm подложке сопровождается существенным снижением коэффициента отражения  $R_{qf}$  (рис. 3). Этот факт имеет принципиальное значение для создания защитных электромагнитных экранов, так как одновременно с поглощением происходит снижение



**Рис. 4.** Зависимости оптических коэффициентов пленки 8.6 нм на 6-мм подложке (комбинация 4 + 2) от частоты, измеренные при падении волны со стороны пленки ( $R_{fq}$  (■),  $T_{fq}$  (◆),  $A_{fq}$  (◄)) и со стороны кварцевой подложки ( $R_{qf}$  (▼),  $T_{qf}$  (▲) и  $A_{qf}$  (►)) (a) Зависимости коэффициентов ( $R_{qf}$  (▼),  $T_{qf}$  (▲) и  $A_{qf}$  (►)) (b) и ( $R_{fq}$  (■),  $T_{fq}$  (◆),  $A_{fq}$  (◄)) (c) от толщины пленки  $d$  на 6-мм подложке, измеренные на частоте 8.5 GHz. Символы соединены линиями для наглядности.



**Рис. 5.** Зависимости коэффициентов  $R, T, A$  от частоты, измеренные для пленки 8.6 нм на 8-мм подложке (комбинация 4 + 4 мм). Штриховой линией показана рассчитанная зависимость коэффициента отражения чистой 8-мм подложки (a). Зависимости коэффициентов  $R_{qf}, T_{qf}$  и  $A_{qf}$  от толщины пленки, измеренные на частоте 10.5 GHz (b).

уровня паразитных отражений и минимизируется эффект возникновения ярких бликовых пятен. При этом пленки с толщинами до 10 нм (рис. 1, a) хорошо

пропускают излучение в оптическом диапазоне, что позволяет использовать их для оптически прозрачных экранов.

## Финансирование работы

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 20-07-00903.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] В.А. Вдовин, В.Г. Андреев, П.С. Глазунов, И.А. Хорин, Ю.В. Пинаев. *Опт. и спектр.*, **127** (11), 834 (2019). DOI: 10.21883/OS.2019.11.48524.132-19 [V.A. Vdovin, V.G. Andreev, P.S. Glazunov, I.A. Khorin, Yu.V. Pinaev. *Opt. Spectrosc.*, **127** (5), 907 (2019). DOI: 10.1134/S0030400X19110274].
- [2] A. E. Kaplan. *J. Opt. Soc. Am. B.*, **35** (6), 1328 (2018). DOI: 10.1364/JOSAB.35.001328
- [3] В.Г. Андреев, В.А. Вдовин, П.С. Глазунов, А.Б. Васильев, Ю.В. Пинаев, И.А. Хорин, В.А. Черепенин. *Докл. РАН. Физ., технич. науки*, **495** (6), 78 (2020). DOI: 10.31857/S2686740020060036 [V.G. Andreev, V.A. Vdovin, P.S. Glazunov, A.B. Vasiliev, Yu.V. Pinaev, I.A. Khorin, V.A. Cherepenin. *Doklady Physics*, **65** (12), 447 (2020). DOI: 10.1134/S1028335820120010].
- [4] C. Ji, D. Liu, C. Zhang, L.J. Guo. *Nat. Commun.*, **11**, 3367 (2020). DOI: 10.1038/s41467-020-17107-6
- [5] P.P. Kuzhir, A.G. Paddubskaya, S.A. Maksimenko, T. Kaplas, Yu. Svirko. *Nanoscale Res. Lett.*, **8** (1), 60 (2013). DOI: 10.1186/1556-276X-8-60
- [6] H. Wang, Y. Zhang, C. Ji, C. Zhang, D. Liu, Z. Zhang, Z. Lu, J. Tan, L.J. Guo. *Adv. Sci.*, **6** (19), 1901320 (2019). DOI: 10.1002/advs.201901320
- [7] R.S. Sennett, G.D. Scott. *J. Opt. Soc. Am.*, **40** (4), 203 (1950). DOI: 10.1364/JOSA.40.000203
- [8] М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики* (Наука, Москва, 1973).
- [9] И.В. Лебедев. *Техника и приборы СВЧ* (Высшая школа, Москва, 1970), т. 1.