

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.12.10>

УДК: 535.361

## ТОНКИЕ ПЛЕНКИ АЛЮМИНИЯ В КАЧЕСТВЕ ЗЕРКАЛ МИКРОВОЛНОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

М.А. Тарасов<sup>1</sup>, Д.С. Жогов<sup>1</sup>, А.М. Чекушкин<sup>1</sup>, Р.К. Козулин<sup>1</sup>,  
А.С. Марухно<sup>2</sup>, А.А. Татаринцев<sup>3</sup>, А.А. Ломов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,  
125009, Россия, Москва, ул. Моховая 11, к. 7.

<sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН,  
369167, Россия, Карачаево-Черкесия, п. Нижний Архыз

<sup>3</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
Физико-технологический институт им. К.А. Валиева,  
117218, Россия, Москва, Нахимовский просп. 36 к.1.

Статья поступила в редакцию 8 декабря 2025 г.

**Аннотация.** Тонкопленочные зеркала применяются для изготовления квазиоптических высокодобротных резонаторов и зеркал, оптических и радиотелескопов. Качество пленок и их отражающие характеристики могут существенно влиять на параметры таких устройств. Проведен цикл рентгеноструктурных, электронно-микроскопических, атомно-силовых исследований, а также измерение коэффициентов отражения на частотах 30-300 ГГц. Для пленок толщиной 100, 200, 300 нм, нанесенных методами магнетронного и термического напыления, измерены коэффициенты отражения по мощности от пленки, прижатой к открытому концу выходного волновода направленного ответвителя. На частотах выше 90 ГГц коэффициент отражения по мощности превышал 0,97 в пределах точности измерений 0.03. Исходя из этих результатов можем заключить, что отражающие свойства зеркала БТА

позволяют работать на частотах выше 90 ГГц без потерь на отражение на зеркалах.

**Ключевые слова:** тонкие металлические пленки, Al, термическое напыление, магнетронное напыление, коэффициент отражения, потери, тепловые шумы.

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по гранту 23-79-00022

**Автор для переписки:** Тарасов Михаил Александрович [tarasov@hitech.cplire.ru](mailto:tarasov@hitech.cplire.ru)

## **Введение**

Постоянный интерес к исследованиям нашей Вселенной поддерживается тайной ее зарождения (Большого взрыва), эволюции и будущего. Сегодня такие исследования невозможны без регистрации широкого спектра электромагнитного излучения, несущего информацию от протекающих во Вселенной процессов. В последние десятилетия наблюдается повышенный интерес к излучению терагерцового диапазона с длинами волн 0,03-3мм, позволяющего получить информацию о протекающих во Вселенной событиях. Несмотря на слабую интенсивность этого терагерцового излучения из-за поглощения в атмосфере благоприятным фактором для его регистрации является наличие полос пропускания. Возникает задача по разработке приборов и устройств для терагерцового диапазона частот. Одним из перспективных направлений создания устройств для СВЧ сигналов является формирование тонкопленочных приборов на основе тонких металлических пленок меди, серебра, алюминия и др. с высокой проводимостью.

Существенным фактором использование тонких пленок для регистрации ТГц излучения является величина скин-слоя материала, используемого в различных элементах схемы регистрации, например, покрытием фокусирующего 6-метрового параболического зеркала БТА является тонкопленочный алюминий. В наших работах [1,2,3] разрабатывается техника и методика наблюдений в субтерагерцовом диапазоне на оптическом 6-метровом телескопе БТА с отражающей пленкой из алюминия толщиной 100 нм. Проведен цикл исследований

пленок алюминия при различных методах и условиях нанесения [2,4,5,6]. В случае слоя металла толщиной больше толщины скин-слоя и глубины проникновения магнитного поля при расчете отражающих характеристик можно пользоваться значениями удельного сопротивления для массивного высококачественного металла и получать коэффициенты отражения не хуже 0.99. Однако в современных радиотелескопах-рефракторах с целью снижения массы и удешевления конструкции применяют отражающие покрытия, нанесенные на стеклянные и углепластиковые основания. В этом случае становится важным получение высокого коэффициента отражения при нанесении относительно тонких пленок порядка сотен нанометров. В нашей работе проведено детальное исследование пленок алюминия, осажденных на стеклянные подложки в различных условиях и сравнение с пленкой-свидетелем, нанесенной одновременно с отражающей пленкой основного зеркала телескопа БТА.

## **1. Методика нанесения**

Первая группа тестовых образцов напылялась методом термического испарения из вольфрамовой лодочки в модифицированной напылительной установке Leybold Z400. Выбор подложки определялся по аналогии с алюминиевыми пленками-свидетелями, которые напылялись на предметном стекле, близком по параметрам к материалу основного шестиметрового зеркала телескопа БТА (большой альт-азимутальный телескоп САО РАН). Толщина пленки зеркала телескопа БТА составляет около 100 нм, что вполне достаточно для измерений в оптическом диапазоне, но может быть недостаточно на частотах порядка 100 ГГц, когда толщина скин-слоя составляет примерно 250 нм из расчета значения проводимости как у идеального алюминия. Кроме того, позади металлической пленки находится толстый слой стекла, который также необходимо учитывать при оценке коэффициента отражения. Для сравнения с пленкой-свидетелем мы изготовили образцы толщиной 100, 200, 300 нм методом термического напыления, а также образец 100 нм магнетронным напылением на таких же подложках из предметных стекол для микроскопа. Известно,

что осаждение пленок на подложку при использовании метода термического испарения происходит в рамках островковой модели Вольмера-Вебера. Пленки алюминия, в частности, состоят из гранул – отдельных поликристаллов с оксидными слоями и остаточными примесями, с пустотами между ними. Алюминий принадлежит к химически активным металлам, которые интенсивно поглощают остаточные газы, а малая скорость его осаждения приводит к увеличению загрязнения пленки металла оксидами. Образующиеся структурные дефекты приводят к увеличению электрического сопротивления и оптического поглощения пленок.

## 2. Микроструктурные исследования

Сразу после напыления исследовали микроструктуру образцов с пленками. На рис. 1 приведены результаты измерения состава пленки-свидетеля, на рис. 2 прозрачность этой пленки в оптическом диапазоне, на рис. 3 плотность пленок при различных условиях напыления в лаборатории, на рис. 4 изображение скола пленки напыленной в лаборатории, в сканирующем электронном микроскопе. Изображения сколов пленок свидетелей в электронном микроскопе приведены на рис. 5.

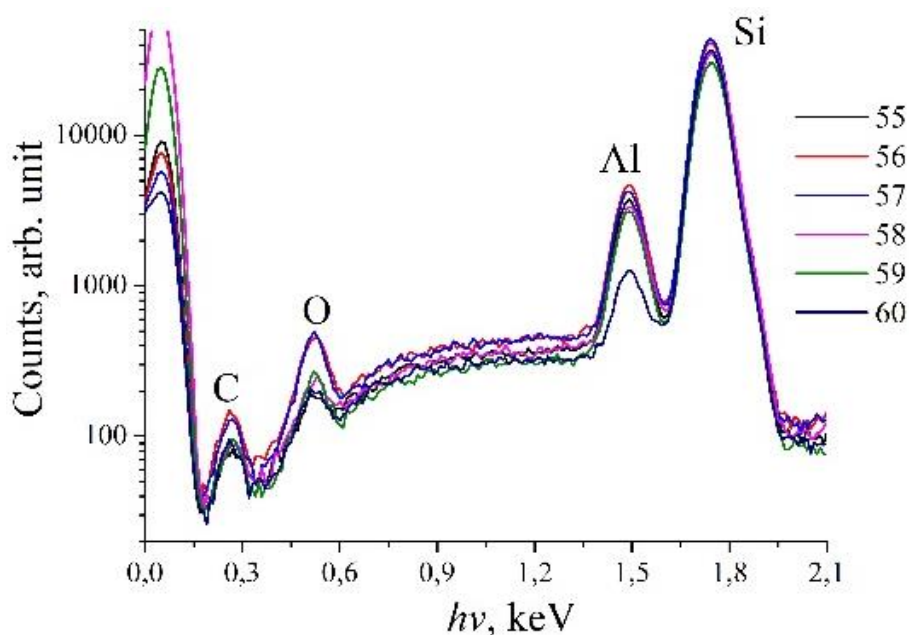


Рис. 1. Состав полученных пленок. Видно присутствие кислорода и углерода.

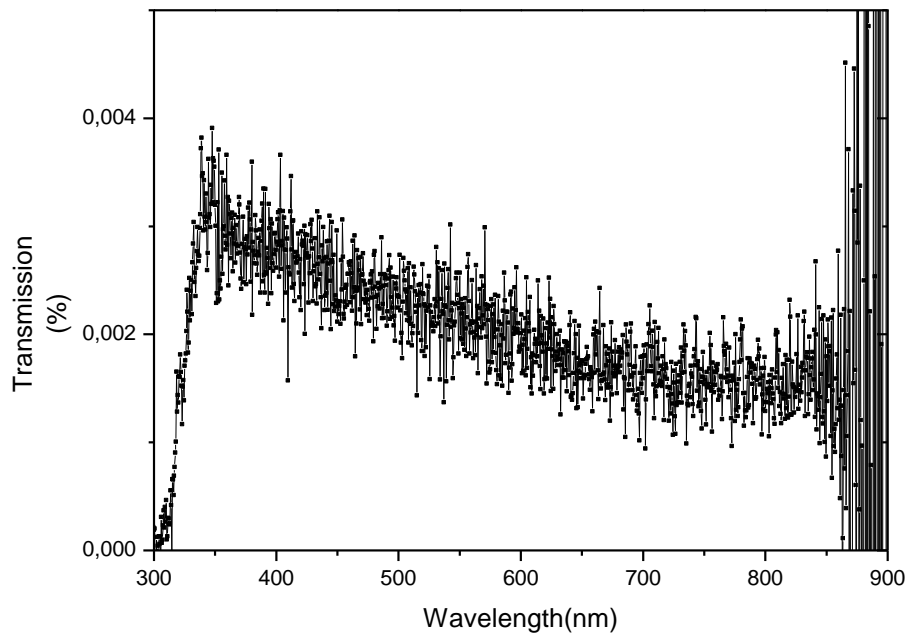


Рис. 2. Прозрачность пленки в оптическом диапазоне.

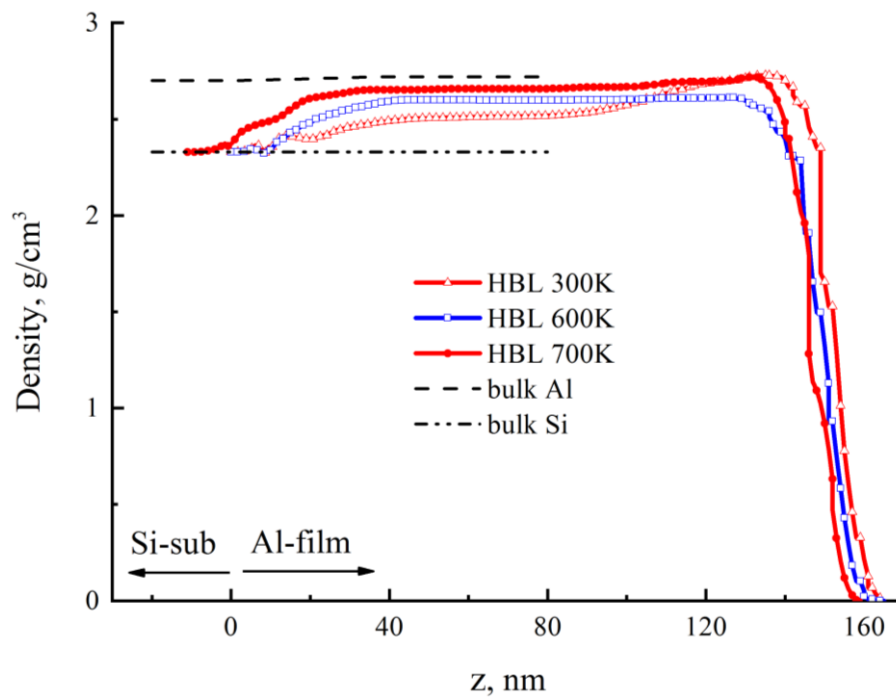


Рис. 3. Плотность пленок при разной температуре подложки при напылении.

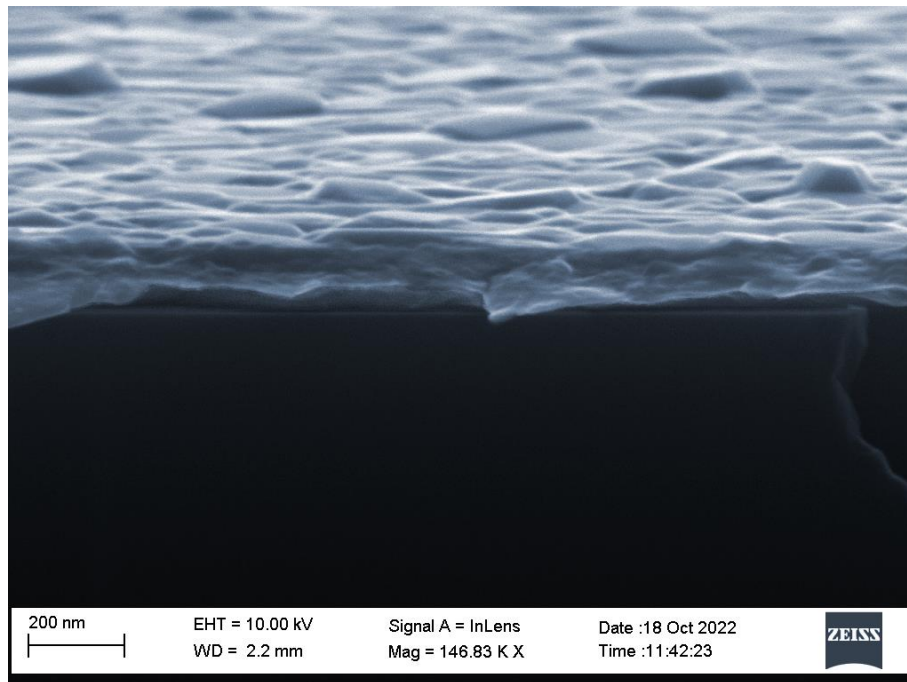


Рис. 4. Скол пленки, напыленной термически в лаборатории.

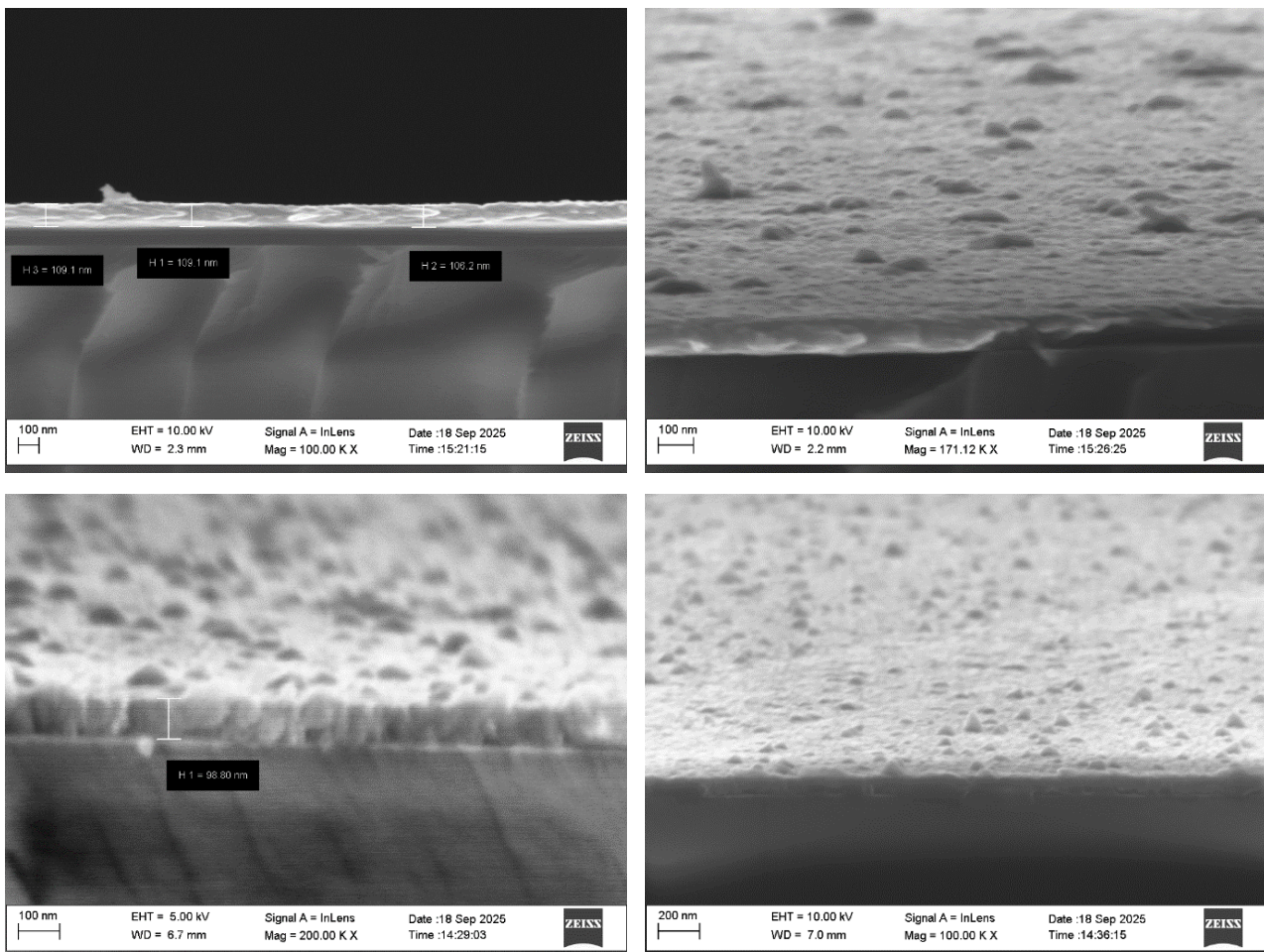


Рис. 5. Поверхность и сколы со свидетелей с разных участков зеркала.

### 3. Электрические измерения

Для оценки возможных вносимых потерь были измерены коэффициенты отражения от пленок-свидетелей и контрольных пленок разной толщины, напыленных термическим и магнетронным методом. Фотография измерительного стенда диапазоне 25-38 ГГц в составе генератора Г4-156, направленного ответвителя и осциллографа УРО1104 приведена на рис. 6. На частотах до 190 ГГц измерения проводили с использованием переоборудованных измерителей КСВ и ослаблений типа Р2-68 и Р2-69. На частотах до 375 ГГц использованы источники ЛОВ типа ОВ-66 и ОВ-65 с соответствующими волноводными направленными ответвителями, механическим модулятором, пироэлектрическим приемником МГ-32 и синхронным детектором. Результаты измерений на самом низкочастотном диапазоне приведены в Табл. 1. Даже в этом диапазоне с самой большой глубиной скин-слоя отражение от пленок-свидетелей оказывается приемлемым для зеркал телескопа.

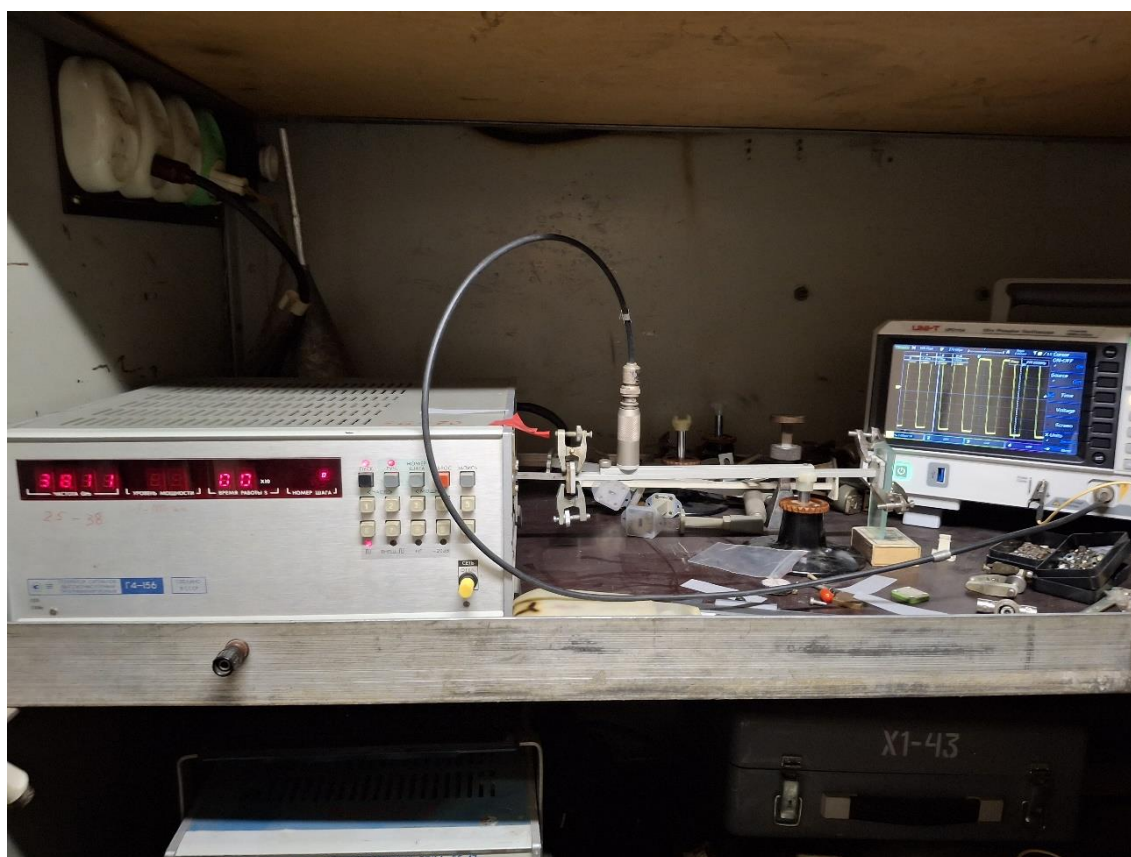


Рис. 6. Фотография измерительного стенда диапазона 25-38 ГГц.

Таблица 1. Результаты измерения коэффициентов отражения на частоте 38 ГГц.

Образец	V(мВ)	V/V <sub>Ag</sub>	(V/V <sub>Ag</sub> ) <sup>2</sup>	Rs <sub>q</sub>
Закоротка, Ag	14,6	1	1	0,05
1 подложка	6,2	0,42	0,176	
6 подложек	1,88	0,13	0,017	
Свидетель Ц	14,4	0,98	0,97	1,2
Свидетель + 6 подложек	14,4	0,98	0,97	
100 нм, магнетрон.	14,2	0,97	0,94	2,0
100 нм, терм.	14,3	0,98	0,97	1,9
200 нм, терм.	14,4	0,98	0,97	0,85
300 нм, терм.	14,5	0,99	0,98	0,7

## Заключение

На частотах выше 90 ГГц коэффициент отражения по мощности превышал 0,97 в пределах точности измерений 0,03. Исходя из этих результатов можем заключить, что отражающие свойства зеркала БТА позволяют работать на частотах выше 90 ГГц без учета потерь на отражение на зеркалах.

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по гранту 23-79-00022.

## Литература

1. M.A. Tarasov, A.A. Gunbina, A.M. Chekushkin, M.A. Markina, R.A. Yusupov, M.Yu. Fominskii, L.V. Filippenko, V.S. Edelman, V.F. Vdovin, V.S. Stolyarov, I.I. Zinchenko, A.M. Krasilnikov, A.S. Marukhno, M.A. Mansfeld, D.E. Kukushkin, D.A. Sazonenko, O.S. Bolshakov, A.B. Ermakov, I.V. Lesnov, A.F. Valeev, SINIS Detectors in the Subterahertz Range as a Basis for a Receiver for Radio Astronomical Research on the BTA Optical Telescope (SAO RAS), *Astrophysical Bulletin*, 2025, Vol 80, No 3, pp 502-518, <https://doi.org/10.1134/S1990341324600996>.
2. А. Ломов, М.А. Тарасов, К.Д. Щербачев, А.А. Татаринцев, А.М. Чекушкин, Анализ электрического сопротивления тонких пленок Al на основе данных об их плотности, *Микро- и наноэлектроника – 2025: Труды междунар. Конф. (6-10 октября 2025, Ярославль РФ)*, Щ2-07, с. 120, ISBN 978-5-317-07443-2 <https://doi.org/10.29003/m4737.ICMNE-2025>.

3. Ю.Ю. Балегга, А.Ф. Валеев, Г.Г. Валявин, В.Ф. Вдовин, А.В. Вдовин, А.А. Гунбина, В.К. Дубрович, М.В. Ефимова, С.А. Капустин, А.М. Красильников, Д.Е. Кукушкин, И.В. Леснов, М.А. Мансфельд, А.С. Марухно, Н.А. Марухно, К.В. Минеев, В.В. Паршин, В.А. Сальков, В.А. Столяров, М.А. Тарасов, А.М. Трояновский, М.Ю. Фоминский, В.С. Эдельман, А.И. Яворовская, Система для наблюдений в субтерагерцовом диапазоне на оптическом 6-метровом телескопе БТА, Доклады РАН, Физика, 2025 (в печати).
4. М.А. Тарасов, А.А. Ломов, А.М. Чекушкин, А.А. Татаринцев, Б.М. Середин, М.А. Маркина, Е.Ф. Позднякова, А.Д. Голованова, М.В. Стрелков, Д.С. Жогов, Р.К. Козулин, К.Ю. Арутюнов, Морфология и электрические параметры тонких алюминиевых пленок, осаждаемых на подложки при температурах от 77 до 800 К, Письма в ЖТФ, 2025, том 51, вып. 4, с. 42-45. <https://doi.org/10.61011/PJTF.2025.04.59843.20149>.
5. М.А. Тарасов, А.А. Ломов, К.Д. Щербачев, А.А. Татаринцев, М.В. Стрелков, Д.С. Жогов, Р.К. Козулин, А.М. Чекушкин, М.А. Маркина, А.Д. Голованова, А.М. Трояновский, Особенности сопротивления, критической температуры и микроструктуры криогенных тонких пленок алюминия, ФТТ, 2025, том 67, вып. 7, с. 1240-1245. <https://doi.org/10.61011/FTT.2025.07.61180.18HH-25>.
6. А.А. Lomov, М.А. Tarasov, К.Д. Shcherbachev, А.А. Tatarintsev, А.М. Chekushkin, Complementary studies of aluminum thin films: resistivity and real structure, Russian Microelectronics, 2025, vol 54, no 5, pp 494-505. <https://doi.org/10.1134/S1063739725600554>.

**Для цитирования:**

Тарасов М.А., Жогов Д.С., Чекушкин А.М., Козулин Р.К., Марухно А.С., Татаринцев А.А., Ломов А.А. Тонкие пленки алюминия в качестве зеркал микроволновых отражателей. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.12.10>