

13

Экранирующие свойства оптически прозрачных тонкопленочных сэндвич-структур $\text{In}_2\text{O}_3/\text{Ag}/\text{In}_2\text{O}_3$

© С.В. Неделин¹, Н.А. Золотовский¹, А.С. Воронин^{1–3}, И.А. Тамбасов^{4,5}, М.О. Макеев²,
Б.А. Паршин², Е.Л. Бурьянская², П.А. Михалёв², М.М. Симуни^{1,2}, С.В. Хартов³

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

³ Федеральный исследовательский центр „Красноярский научный центр СО РАН“, Красноярск, Россия

⁴ ООО „Спецтехнаука“, Красноярск, Россия

⁵ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

E-mail: a.voronin1988@mail.ru

Поступило в Редакцию 9 сентября 2024 г.

В окончательной редакции 24 декабря 2024 г.

Принято к публикации 26 декабря 2024 г.

Проведены синтез и комплексное исследование оптоэлектрических и экранирующих свойств оптически прозрачных проводящих сэндвич-структур $\text{In}_2\text{O}_3/\text{Ag}/\text{In}_2\text{O}_3$ на гибкой подложке из полиэтилентерефталата. Изучена взаимосвязь между толщиной слоя серебра и оптоэлектрическими параметрами сэндвич-структур $\text{In}_2\text{O}_3/\text{Ag}/\text{In}_2\text{O}_3$. Измерение коэффициентов пропускания и отражения в диапазоне 0.01–7 GHz показало четкую корреляцию между поверхностным сопротивлением и коэффициентом пропускания. Показано, что полученные результаты могут быть описаны моделью тонкого слоя в диапазоне 0.01–7 GHz.

Ключевые слова: прозрачные проводящие покрытия, экранирование, радиоволны, гибкая электроника.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.09.60222.20109

Прозрачные проводящие покрытия являются ключевыми материалами оптоэлектроники [1]. Помимо оптоэлектроники одной из важных сфер применения прозрачных проводящих покрытий является экранирование прозрачных объектов, что актуально для метрологии и защиты информации [2,3]. Экранирование окон, смотровых отверстий в метрологических помещениях и устройств вывода информации способствует снижению влияния помех на работу прецизионного измерительного оборудования и предотвращает кражу конфиденциальной информации.

Основным классом материалов, применяемых на практике, являются прозрачные проводящие оксиды (ППО) [4]. Однако пленки ППО имеют высокие эксплуатационные параметры лишь на стеклянных подложках. Одной из альтернатив для ППО являются тонкопленочные структуры оксид/металл/оксид (ОМО) [5]. ОМО-покрытия сочетают в себе низкое поверхностное сопротивление, высокое пропускание в видимом диапазоне и высокий коэффициент экранирования, а также совместимы с полимерными подложками в отличие от пленок ППО. Однако их потенциал в решении задач экранирования радиоизлучения исследован недостаточно, что обуславливает актуальность настоящей работы.

Сэндвич-структуры $\text{In}_2\text{O}_3/\text{Ag}/\text{In}_2\text{O}_3$ (далее структуры IAI) формировались методом последовательного магнетронного напыления на постоянном токе в импульсном режиме. На подложку из полиэтилентерефталата (PET) толщиной 50 μm напылялись подслой и закрывающий слой, состоящие из оксида индия (толщина 20 nm),

в качестве центрального слоя использовалось серебро (толщина 9, 13 и 17 nm). Оксид индия наносился реактивным методом из металлической мишени индия при мощности 100 W в атмосфере газов аргона и кислорода с соотношением 79/21 [%] соответственно, остаточное давление $4.4 \cdot 10^{-3}$ Торг. Распыление серебра производилось в атмосфере аргона при мощности 50 W и остаточном давлении $4.4 \cdot 10^{-3}$ Торг. Оценочная скорость напыления серебра составляла 1.1 Å/s, оксида индия — 1.7 Å/s. Толщина каждого слоя определялась при помощи кварцевого резонатора.

Морфология слоя оксида индия (рис. 1, a) и серебра на слое оксида индия исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии S 5500 (SEM, Hitachi, Япония). Пленка серебра толщиной как 9 nm (рис. 1, b), так и 17 nm (рис. 1, c) имеет устойчивую перколяцию между отдельными зернами, однако размер зерна увеличивается с увеличением толщины пленки. Тем не менее структура слоя серебра значительным образом определяется подслоем и в целом повторяет характерные размеры зерен подслоя оксида индия. Шероховатость поверхности сэндвич-структур IAI исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (AFM, Ntegra Prima, NT-MDT SI, Россия), радиус закругления зонда составлял 10 nm. На рис. 1, d приведены профили поверхности, среднеквадратичная шероховатость сэндвич-структур IAI увеличивается с увеличением толщины прослойки серебра и составляет 2 ± 1 , 3 ± 1 и 4 ± 1 nm соответственно. Данное поведение нетипично для ультратонких пленок металлов на стекле и кремнии, у кото-

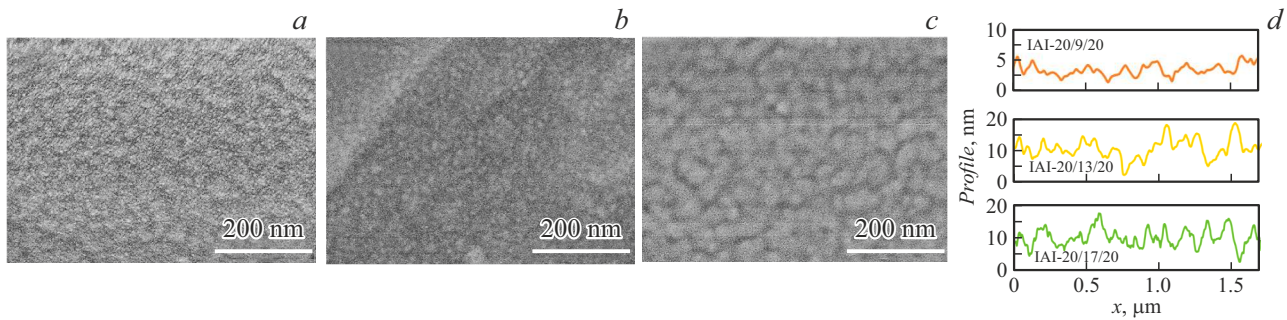


Рис. 1. SEM-изображения морфологии пленок исходного слоя оксида индия на PET (*a*) и пленок серебра толщиной 9 (*b*) и 17 nm (*c*) на подслое оксида индия (увеличение 200k). *d* — профили шероховатости поверхности сэндвич-структур IAI с различной толщиной серебра.

рых шероховатость снижается с увеличением толщины. По нашему предположению такое поведение связано с откликом PET-подложки на термическое воздействие в процессе напыления сэндвич-структур IAI.

Спектральное пропускание измерялось при помощи спектрофотометра Shimadzu UV-3600i plus (Shimadzu, Япония) с интегрирующей сферой. На рис. 2, *a* приведено пропускание в диапазоне 300–2600 nm для референсной PET-подложки и сэндвич-структур IAI. Как правило, тонкие металлические пленки имеют низкое пропускание за счет потерь в тонком слое металла. Поскольку потери на поглощение в тонкой пленке металла незначительны, одним из механизмов потерь является отражение излучения на границе раздела металл–воздух. Нанесение поверх пленки металла слоя прозрачного оксида позволяет снизить потери на отражение, тем самым просветляя всю структуру [6]. Верхний слой оксида индия выполняет функцию антиотражающего покрытия. Следует отметить, что наблюдаются конкурирующие процессы между увеличением пропускания за счет антиотражающих свойств пленки оксида индия и снижением пропускания за счет увеличения толщины слоя серебра, что обуславливает неоднозначность поведения спектров в видимой области. Пропускание на длине волны 500 nm для структур с прослойкой серебра толщиной 9, 13 и 17 nm составляет 71.46, 73.35 и 72.28 % соответственно. Однако интегральное пропускание в видимом диапазоне заметно снижается с увеличением толщины слоя серебра, что коррелирует с литературными данными [7]. В ближнем ИК-диапазоне (780–2600 nm) наблюдается равномерное снижение пропускания для всех сэндвич-структур IAI. Четко наблюдается взаимосвязь между толщиной слоя серебра и коэффициентом пропускания.

Измерение поверхностного сопротивления сэндвич-структур IAI выполнено четырехзондовым методом на установке ST2258C (Jingge Electronics Co., Китай), оно составляет 31 ± 6 , 14 ± 3 и $6 \pm 2 \Omega/\text{sq}$ соответственно. Электрический транспорт можно описать в рамках модели трех параллельно соединенных резисторов. Согласно этой модели, основной вклад в электропроводность

сэндвич-структуры IAI вносит слой с минимальным сопротивлением, т.е. слой серебра. Для пленок серебра, напыленных на подслое оксида индия, описанных выше, поверхностное сопротивление составляло 15 ± 6 , 10 ± 3 и $5 \pm 1 \Omega/\text{sq}$ соответственно. Как видно, значения отличаются от значений, характерных для конечных сэндвич-структур IAI. Отметим, что поверхностное сопротивление для структуры IAI с прослойкой серебра толщиной 9 nm имеет наибольшее расхождение, что связано с частичным окислением поверхности нанокристаллитов серебра в процессе реактивного напыления слоя оксида индия, закрывающего сэндвич-структуру, причем для пленки толщиной 9 nm данный эффект более выражен за счет того, что средний размер кристаллита существенно меньше.

Коэффициенты пропускания (S_{21}) и отражения (S_{11}) в диапазоне 0.01–7 GHz измеряли при помощи коаксиальной ячейки, подробное описание эксперимента приведено в нашей предыдущей работе [8]. На рис. 2, *b* приведены результаты измерения коэффициента пропускания для трех типов сэндвич-структур IAI. Коэффициент пропускания сэндвич-структур IAI постоянен во всем исследуемом диапазоне. Сэндвич-структуры IAI могут быть охарактеризованы усредненным коэффициентом пропускания по всему исследуемому диапазону. Увеличение толщины прослойки серебра приводит к последовательному снижению коэффициента пропускания. Увеличение толщины серебра с 9 до 17 nm приводит к снижению коэффициента пропускания с -16.42 до -31.12 dB.

Коэффициент экранирования (SE) сплошных структур типа ОМО связан с коэффициентом пропускания зависимостью $SE = -10 \lg S_{21}$ и может быть оценен при помощи модели тонкого слоя [9]:

$$SE = 20 \lg \left(1 + \frac{Z_0}{2R} \right), \quad (1)$$

где R — поверхностное сопротивление, $Z_0 = 377 \Omega$ — импеданс вакуума. Эта простая модель позволяет сравнить экспериментальные и модельные результаты.

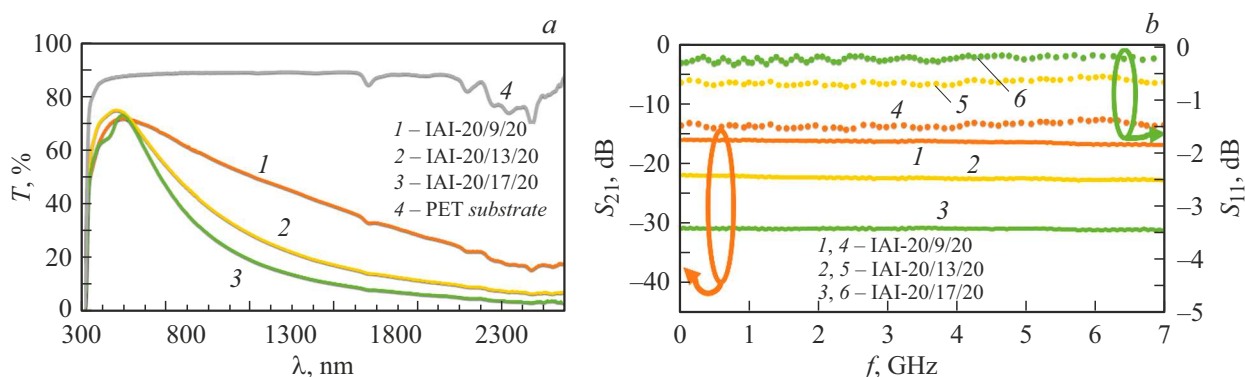


Рис. 2. *a* — пропускание в видимом и ближнем ИК-диапазонах; *b* — коэффициенты пропускания и отражения сэндвич-структур IAI в диапазоне 0.01–7 GHz.

Усредненный энергетический баланс сэндвич-структур IAI

Образец	S_{11} , %	S_{21} , %	A , %	SE , dB	SE_{calc} , dB
IAI-20/9/20	70.6	2.28	27.12	16.42	16.91
IAI-20/13/20	84.9	0.56	14.54	22.55	23.03
IAI-20/17/20	94.2	0.077	5.72	31.12	29.67

Спектры отражения сэндвич-структур IAI в диапазоне 0.01–7 GHz показаны на рис. 2, *b*. Отражение равномерно по всему исследуемому диапазону. Увеличение толщины прослойки серебра увеличивает долю отраженного излучения. Полный энергетический баланс сэндвич-структур IAI в диапазоне 0.01–7 GHz, вычисленный по формуле $S_{11} + S_{21} + A = 1$ (A — коэффициент поглощения), приведен в таблице.

Таким образом, в работе описано получение тонкопленочных сэндвич-структур $\text{In}_2\text{O}_3/\text{Ag}/\text{In}_2\text{O}_3$, являющихся перспективными оптически прозрачными экранами электромагнитного излучения. Спектральное пропускание в диапазоне 0.01–7 GHz постоянно и коррелирует с моделью тонкого слоя. Максимальный коэффициент экранирования в диапазоне 0.01–7 GHz был получен для сэндвич-структуры IAI с толщиной слоя серебра 17 nm и составил 31.12 dB. Высокий коэффициент экранирования при высоком пропускании в видимом диапазоне демонстрирует перспективность сэндвич-структур IAI для практического использования.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № FSN-2024-0066).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Morales-Masis, S. De Wolf, R. Woods-Robinson, J.W. Ager, C. Ballif, *Adv. Electron. Mater.*, **3** (5), 1600529 (2017). DOI: 10.1002/aclm.201600529
- [2] D. Tan, C. Jiang, Q. Li, S. Bi, X. Wang, J. Song, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **32**, 25603 (2021). DOI: 10.1007/s10854-021-05409-4
- [3] А.С. Воронин, Ю.В. Фадеев, И.В. Говорун, А.С. Волошин, И.А. Тамбасов, М.М. Симунин, С.В. Хартов, *Письма в ЖТФ*, **47** (5), 31 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.05.50674.18496 [A.S. Voronin, Y.V. Fadeev, I.V. Govorun, A.S. Voloshin, I.A. Tambasov, M.M. Simunin, S.V. Khartov, *Tech. Phys. Lett.*, **47**, 259 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021030159]
- [4] A.K. Akhmedov, E.K. Murliev, A.S. Asvarov, A.E. Muslimov, V.M. Kanevsky, *Coatings*, **12** (10), 1583 (2022). DOI: 10.3390/coatings12101583
- [5] A.K. Akhmedov, A.K. Abduv, V.M. Kanevsky, A.E. Muslimov, A.S. Asvarov, *Coatings*, **10** (3), 269 (2020). DOI: 10.3390/coatings10030269
- [6] H. Matsunami, S. Matsumoto, T. Tanaka, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **16**, 1491 (1977). DOI: 10.1143/JJAP.16.1491
- [7] N. Ren, J. Zhu, S. Ban, *AIP Adv.*, **7**, 055009 (2017). DOI: 10.1063/1.4982919
- [8] A. Osipkov, M. Makeev, E. Konopleva, N. Kudrina, L. Gorobinskiy, P. Mikhalev, D. Ryzhenko, G. Yurkov, *Materials*, **14** (23), 7178 (2021). DOI: 10.3390/ma14237178
- [9] C.A. Klein, *Proc. SPIE*, **1112** (1989). DOI: 10.1117/12.960783