

09;13

Спектральные характеристики пленок хрома нанометровой толщины в терагерцовом диапазоне частот

© В.Г. Андреев¹, А.А. Ангелуц¹, В.А. Вдовин², В.Ф. Лукичев³¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва³ Физико-технологический институт РАН, Москва

E-mail: vdv@cplire.ru

Поступило в Редакцию 10 сентября 2014 г.

Проведены исследования оптических коэффициентов (коэффициентов отражения, прохождения и поглощения) тонких пленок хрома на кварцевой подложке. Измерения выполнены с использованием импульсного источника терагерцового излучения. Получены спектральные зависимости оптических коэффициентов в диапазоне частот 0.25–1.1 THz. Представлены зависимости оптических коэффициентов от толщины пленки на частоте 1 THz. Зарегистрирован максимум коэффициента поглощения 43% при толщине пленки 10 nm.

Использование терагерцового излучения для скрининга объектов, непрозрачных в оптическом диапазоне длин волн, а также для целей медицинской диагностики обуславливает необходимость создания высокочувствительных детекторов. В [1,2] повышение чувствительности болометров в THz-области осуществляется путем применения специальной слоистой структуры и пленок хрома или алюминия толщиной 10–20 nm.

Коэффициенты отражения, прохождения и поглощения волн на частоте 37.5 GHz при использовании алюминиевых нанометровых пленок на кварцевой подложке были исследованы в работе [3]. Обнаруженный эффект аномально большого (до 60%) поглощения электромагнитного излучения было предложено использовать для регистрации СВЧ-импульсов наносекундной длительности. По результатам этих работ был разработан и апробирован термоакустический детектор (ТАД) коротких СВЧ-импульсов [4]. Теоретические оценки показы-

вают, что термоакустический приемник с тонкими пленками может быть использован также для регистрации импульсов в терагерцовом диапазоне частот. Были проведены эксперименты по детектированию излучения гиротрона в диапазоне 0.5–0.9 THz, которые продемонстрировали равномерную чувствительность ТАД в указанном диапазоне частот [5]. Целью данной работы явилось детальное измерение оптических коэффициентов тонких пленок хрома на кварцевой подложке и использование полученных результатов для количественной оценки чувствительности и полосы частот ТАД.

Пленки хрома синтезировались на поверхности кварцевых подложек диаметром 20 mm и толщиной 2 mm методом магнетронного распыления с использованием установки вакуумного осаждения тонких пленок Z-550 фирмы Leybold AG. Вакуумная установка Z-550 позволяет получать пленки высокого качества с достаточно высоким воспроизведением толщины пленки по времени осаждения. Осаждение пленок проводили с использованием мишени хрома чистотой 99.9% с содержанием примесей H — 1 ppm, C — 50 ppm, N — 62 ppm, O — 107 ppm. Мощность постоянного напряжения подаваемого на магнетронный распылитель составляла 0.4 kW, что обеспечивало скорость осаждения пленки хрома 1.1 ± 0.1 nm/s. Пленки хрома заданной толщины получали путем варьирования времени напыления. Толщина пленки контролировалась профилометром Talystep с погрешностью, не превышающей 0.3 nm.

Измерения оптических коэффициентов пленок проводились на установке, основные принципы работы которой описаны в работе [6]. Терагерцовый пучок генерировался на поверхности арсенида индия (InAs) при накачке излучением фемтосекундного титан-сапфирового лазера и коллимировался линзой из кристаллического кварца. На рис. 1 показана упрощенная схема эксперимента. При измерениях коэффициента пропускания металлических пленок терагерцовый пучок *1* падал под углом 45° на металлическое зеркало *2* и отражался на подложку *3* с напыленными пленками хрома различной толщины *4*. Измерения проводились в схеме, когда терагерцовый пучок падал из воздуха на пленку. Для измерения коэффициента отражения пленок схема эксперимента слегка изменялась — вместо зеркала ставилась подложка *3* с пленкой *4*. Различия в геометрии эксперимента учитывались при обработке результатов измерений. Излучение, прошедшее сквозь исследуемый образец (или отраженное от него), фокусировалось линзой *5* на приемную фотопроводящую антенну *6* (ключ Остона).

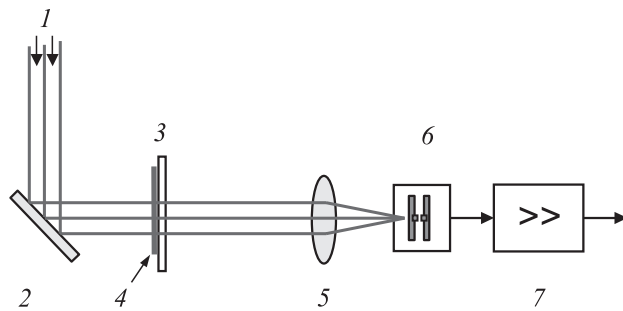


Рис. 1. Схема измерения коэффициента пропускания пленок хрома.

Фототок, пропорциональный величине электрического поля терагерцового излучения, регистрировался синхронным услителем 7, данные с которого передавались в память компьютера. Меняя задержку терагерцового импульса относительно стробирующего оптического импульса, записывался временной профиль терагерцового импульса, т.е. зависимость амплитуды электрической составляющей электромагнитного поля от времени $E(t)$. В качестве источника стробирующих импульсов бралась часть излучения фемтосекундного лазера, использованного для генерации терагерцового пучка.

Исследовались пленки хрома толщиной от 1.5 до 40 nm (1.5, 3, 4.5, 6, 7.5, 10, 20, 30, 40 nm). Диаметр терагерцового пучка был равен 10 mm, поэтому измеренные величины коэффициентов отражения и прохождения представляли собой значения, усредненные по площади пучка. Это позволяло пренебречь локальными неоднородностями напыления металла на подложку.

Временные профили электрического поля терагерцовых импульсов $E(t)$, зарегистрированные при прохождении пленок различной толщины, приведены на рис. 2, а. Опорным является импульс, зарегистрированный в схеме в отсутствие подложки. Импульсы имеют 1–2 осцилляций поля, при этом длительность импульсов составляет 1–1.5 ps. С увеличением толщины пленки амплитуда прошедшего импульса падает.

Амплитудные спектры импульсов вычислялись с использованием преобразования Фурье (рис. 2, б). Деление спектров, полученных при

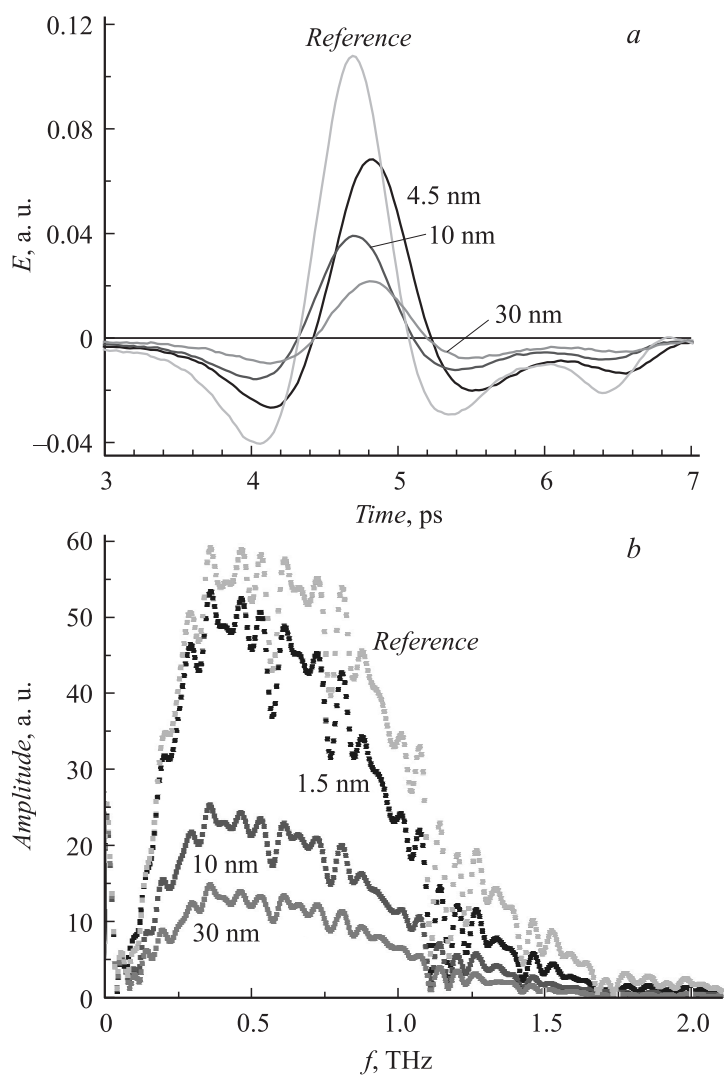


Рис. 2. Профили импульсов (а) и амплитудные спектры импульсов, прошедших через подложку с пленками различной толщины (b).

наличии пленок $S_{sig}(f)$, на опорные спектры $S_{ref}(f)$, т.е. спектры излучения, не взаимодействовавшего с изучаемым объектом, давало амплитудные спектры пропускания $t_s(f)$ или отражения $r_s(f)$:

$$t_s(f) = S_{sig}^t(f)/S_{ref}^t(f), \quad r_s(f) = S_{sig}^r(f)/S_{ref}^r(f). \quad (1)$$

Для получения опорного спектра регистрировался терагерцовый импульс при удалении образца из оптической системы, показанной на рис. 1. Для учета влияния подложки спектры пропускания образцов нормировались на спектр пропускания прозрачной кварцевой подложки без пленки. Спектр поглощения по мощности определялся из соотношения $A = 1 - R - T$, где $T = t_s^2$ и $R = r_s^2$ — спектры пропускания и отражения по мощности.

Измеренная зависимость коэффициента отражения R от частоты в диапазоне 0.25–1.1 ТГц, где описанный метод обеспечивал необходимую точность измерений, приведены на рис. 3, *a*. Зависимости представлены для пленок хрома с толщинами от 7.5 до 40 нм. Зависимости, приведенные на рис. 3, *a*, демонстрируют, что коэффициент R практически не зависит от частоты в диапазоне 0.25–1.1 ТГц. Зависимости, полученные для коэффициентов T и A , также не зависели от частоты в указанном диапазоне. Абсолютная погрешность измерения коэффициентов не превышает 0.025 в указанном диапазоне частот. На частотах, превышающих 1.1 ТГц, в спектре опорного импульса наблюдаются значительные осцилляции (рис. 2, *b*), что приводит к существенному росту погрешности измерений оптических коэффициентов. На более низких частотах ($f < 0.2$ ТГц) точность измерения также снижается в силу малости абсолютных значений спектральной амплитуды и уменьшения отношения сигнала к шуму.

Измеренные зависимости оптических коэффициентов R , T , A от толщины пленки хрома на частоте 1 ТГц показаны на рис. 3, *b* различными символами. С увеличением толщины пленки от 3 до 20 нм коэффициент пропускания довольно быстро уменьшается и затем стабилизируется на уровне 5–6% для пленок толщиной 30–40 нм. Коэффициент отражения быстро возрастает до уровня 50% при толщине 20 нм и затем медленно растет для пленок в диапазоне 20–40 нм. Коэффициент поглощения достигает максимума 43% при толщине 10 нм и затем медленно уменьшается. Зависимость поглощения от толщины на рис. 3, *b* качественно соответствует аналогичной зависимости, приведенной в статье [1] и имеющей характерный максимум при толщине пленки 9 нм.

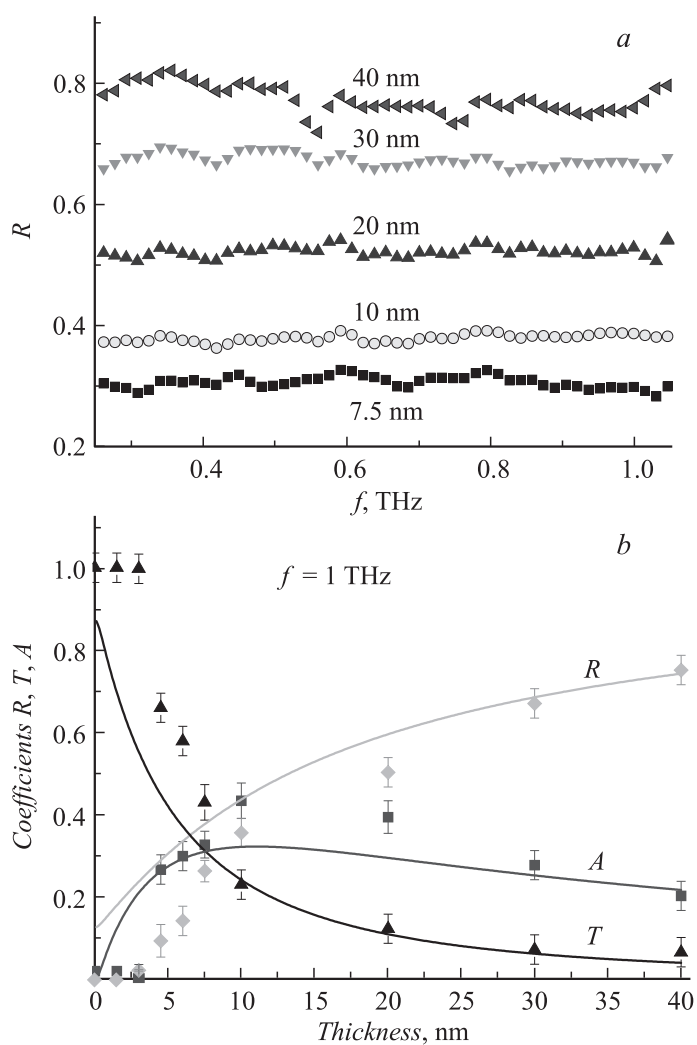


Рис. 3. Измеренный спектр отражения пленок хрома толщиной 7.5, 10, 20, 30 и 40 nm (a). Измеренные (символы) и рассчитанные (линии) зависимости оптических коэффициентов R , T и A от толщины пленки на частоте 1 THz (b).

Теоретический расчет коэффициентов R , T , A выполнен с использованием соотношений, учитывающих феноменологическую зависимость проводимости пленки от толщины [3]:

$$R = \frac{\left((n_3 - n_1) + 2 \frac{d}{b}\right)^2}{\left((n_3 + n_1) + 2 \frac{d}{b}\right)^2}, \quad T = \frac{4n_1 n_3}{\left((n_3 + n_1) + 2 \frac{d}{b}\right)^2}, \quad A = \frac{8 \frac{d}{b} n_1}{\left((n_3 + n_1) + 2 \frac{d}{b}\right)^2}, \quad (2)$$

где d — толщина пленки, n_1 и n_3 — коэффициенты преломления соответственно среды перед металлической пленкой, со стороны которой падает электромагнитное излучение, и среды после металлической пленки, $b = c/2\pi\sigma(d)$, $\sigma(d)$ — удельная проводимость металлической пленки, c — скорость света в вакууме ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с). Использовалась следующая феноменологическая зависимость проводимости пленки от ее толщины:

$$\begin{aligned} \sigma(d) &= \sigma_0(d/2l_0)(1 + \ln(l_0/d)), & d \leq l_0, \\ \sigma(d) &= \sigma_0(1 - l_0/4d), & d > l_0, \end{aligned} \quad (3)$$

где σ_0 — удельная проводимость толстой пленки ($d \gg l_0$), l_0 — средняя длина свободного пробега электрона в объемном материале. Для пленок хрома использовались следующие значения: $l_0 = 0.8$ нм, $\sigma_0 = 8 \cdot 10^5$ С/м. Считалось, что показатели преломления воздуха и кварца на частоте 1 ТГц равны соответственно $n_1 = 1$ и $n_3 = 1.95$ [7].

Результаты расчета оптических коэффициентов показаны на рис. 3, b сплошными линиями. Значение проводимости толстой пленки хрома $\sigma_0 = 8 \cdot 10^5$ С/м, которое было использовано в наших расчетах, на порядок меньше, чем проводимость объемного металла $6.7 \cdot 10^6$ С/м при температуре 20°С [8]. Такая проводимость соответствует значению, полученному для толстых пленок хрома в работе [1] при контактных измерениях. Теоретические зависимости достаточно хорошо соответствуют экспериментальным значениям для пленок с толщинами, превышающими 20 нм. Рассчитанный максимум коэффициента поглощения составляет 0.32 для толщины 11 нм. Экспериментально зафиксирован максимум 0.43 для толщины 10 нм. В области малых толщин ($d < 8$ нм) экспериментальные значения коэффициента пропускания получились выше расчетных, а коэффициента отражения — соответственно ниже расчетных.

Это можно объяснить следующим образом. Структура пленки толщиной в несколько нм имеет зернистый характер, поэтому ее проводящие свойства определяются не только концентрацией электронов проводимости, но также и площадью контактов отдельных зерен. Поэтому при совсем малых толщинах, когда пленка имеет островковую структуру, ее проводимость мала, и пленка по своим свойствам близка к диэлектрику [9]. С ростом толщины пленки площадь контактов растет, и происходит переход к проводящему состоянию пленки. Толщина, при которой наблюдается такой переход, зависит от качества поверхности подложки, свойств самого металла, а также процесса напыления [9]. Судя по экспериментальным зависимостям коэффициентов R , T и A от толщины пленки (рис. 3, *b*), переход от диэлектрика к проводнику наблюдается при толщине пленки 4–5 нм. При толщинах менее 4 нм пропускание пленки практически 100%, а отражение близко к нулю, что соответствует тонкому диэлектрику с показателем преломления, близким к стеклу.

Проведенные исследования показали наличие эффекта аномально высокого (выше 40%) поглощения энергии излучения в пленках хрома, толщина которых много меньше длины волны этого излучения. Максимум поглощения приходится на толщину, которая находится в диапазоне от 9 до 11 нм. Оптические коэффициенты A , R и T пленок с толщинами выше 20 нм достаточно хорошо описываются соотношениями, описанными в работе [3]. При этом значение проводимости σ_0 можно определить из контактных измерений проводимости пленки хрома с толщинами выше 40 нм. Для пленок хрома с толщиной менее 10 нм требуется уточнение теоретической модели проводимости.

Отметим, что экспериментальное измерение коэффициента поглощения тонких пленок хрома имеет принципиальное значение для проектирования и расчета характеристик ТАД коротких импульсов СВЧ- и ТГц-диапазона. В качестве поглотителя электромагнитной энергии в ТАД используются тонкие металлические пленки, напыленные на кварцевую подложку. По результатам работы определена оптимальная толщина пленки хрома (10 нм), которая соответствует максимуму поглощения. Измеренное значение максимального значения коэффициента поглощения (43%) позволяет рассчитать эффективность термоакустического преобразования в структуре пленка–диэлектрик и оценить чувствительность ТАД при использовании пленки толщиной 10 нм. Постоянство коэффициента поглощения в диапазоне 0.25–1.1 ТГц поз-

воляет обеспечить равномерность чувствительности ТАД в указанном частотном диапазоне.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-08-00921, 13-02-12233.

Список литературы

- [1] *Bolakis C., Grbovic D., Lavrik N.V., Karunasiri G.* // Optics G. Express. 2010. V. 18. P. 14 488.
- [2] *Alves F., Kearney B., Grbovic D.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. N 11. P. 111 104.
- [3] *Андреев В.Г., Вдовин В.А., Воронов П.С.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 22. С. 68.
- [4] *Андреев В.Г., Вдовин В.А.* // ПТЭ. 2009. № 2. С. 81.
- [5] *Андреев В.Г., Вдовин В.А., Калынов Ю.К.* // Известия вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56. № 8–9. С. 628.
- [6] *Назаров М.М., Шкуринов А.П., Кулешов Е.А., Тучин В.В.* // Квант. электрон. 2008. Т. 38. № 7. С. 647.
- [7] *Grischkowsky D., Keiding S., Exter M., Fattinger Ch.* // J. Opt. Soc. Am. V. 7. N 10. P. 2006.
- [8] *Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова.* М.: Энергоатомиздат, 1991.
- [9] *Walther M., Cooke D.G., Sherstan C., Hajar M., Freeman M., Hegmann F.A.* // Phys. Rev. B. 2007. V. 76. P. 125 408.