

А.Б. Сотский, С.С. Михеев, Л.И. Сотская
(Могилев, Беларусь),
М.М. Назаров (Москва, Россия)

ЗАКОН БРЮСТЕРА ПРИ ТЕРАГЕРЦОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

Установлено, что в диссипативной структуре диэлектрическая пленка-подложка раствор возможна реализация закона Брюстера, состоящего в наличии дискретного набора углов падения электромагнитного излучения на структуру, при которых коэффициент отражения плоских ТМ, либо ТЕ-волн обращается в нуль. Этот закон использован для максимизации чувствительности терагерцового сенсора концентрации протеина БСА в воде.

Ключевые слова: закон Брюстера, терагерцовый сенсор, водный раствор протеина, пленка на подложке.

It is established that the Brewster's law can be fulfilled in a dissipative structure dielectric film-substrate. In this case the law means the presence of a discrete set of angles of incidence of electromagnetic radiation on the structure, at which the reflection coefficient of plane TM or TE waves vanishes. This law is used to maximize the sensitivity of the terahertz sensor of the concentration of BSA protein in water.

Keywords: Brewster's law, terahertz sensor, protein aqueous solution, film on substrate.

Одной из востребованных в микробиологии и медицине разновидностью терагерцовых (ТГц) сенсоров являются сенсоры состава водных

растворов, однако их создание сталкивается с высоким поглощением ТГц излучения водой [1]. В таких условиях для обеспечения приемлемой чувствительности сенсора при детектировании интересующей примеси в растворе естественно пытаться использовать эффекты резонансного взаимодействия ТГц излучения с диэлектрическими волноводными структурами. Но обычные собственные моды ТГц диэлектрических волноводов, контактирующих с водным раствором, сильно затухают, что исключает создание соответствующих высокодобротных резонаторов. Кроме того, высокая диэлектрическая проницаемость волноводов, которая должна превышать диэлектрическую проницаемость воды, делает проблематичным использование резонансных призмных и решеточных устройств возбуждения собственных мод. В настоящем сообщении показано, что названные трудности можно преодолеть за счет использования закона Брюстера для диссипативных пленочных структур.

Классический закон Брюстера утверждает равенство нулю коэффициента отражения r_p плоской волны ТМ поляризации при ее падении из воздуха на плоскую границу раздела воздух–однородная среда с вещественной диэлектрической проницаемостью ϵ_s под углом $b = \arctg \sqrt{\epsilon_s \epsilon_a^{-1}}$, называемым углом Брюстера. Однако в сенсорах растворов величина ϵ_s имеет большую мнимую часть, что приводит к нарушению данного закона. Тем не менее, наши исследования показали, что в структуре воздух–диссипативная пленка–диссипативная подложка закон Брюстера сохраняет силу, но в отличие от своего классического аналога, он выполняется для конечного дискретного набора углов Брюстера. Поляризация излучения при этом может быть как ТМ, так и ТЕ типа. Освещение названной структуры плоской волной, падающей под углом Брюстера, приводит к возбуждению в ней быстрой моды Ценнека. В результате длина взаимодействия излучения со структурой значительно превосходит длину волны излучения. Этим объясняется высокая чувствительность соответствующих ТГц сенсоров (см. ниже).

При ТГц спектроскопии раствора во временной области с использованием структуры пленка–раствор (последний служит подложкой) определяется спектр отношений $r_p / r_p^{(0)}$, либо $r_s / r_s^{(0)}$, где $r_{p,s}$ – коэффициенты отражения от структуры плоских ТМ и ТЕ волн в присутствии в растворе исследуемой примеси концентрации C , $r_{p,s}^{(0)}$ – эти же коэффициенты при $C = 0$. В качестве критериев чувствительности сенсора мы использовали производные

$$(\partial r / \partial C)_{C=0}, \quad (\partial \varphi / \partial C)_{C=0}, \quad (1)$$

где $\tilde{n} = \left| r_{p,s} / r_{p,s}^{(0)} \right|$, $\varphi = \arg(r_{p,s}) - \arg(r_{p,s}^{(0)})$,

$$(\partial \rho / \partial C)_{C=0} + i(\partial \varphi / \partial C)_{C=0} = (r_{p,s}^{(0)})^{-1} (\partial r_{p,s} / \partial C)_{C=0}. \quad (2)$$

Из (2) видно, что чувствительность сенсора резко возрастает при работе в окрестности углов Брюстера, где $r_{p,s}^{(0)} \rightarrow 0$.

В расчетах была принята модель диэлектрической проницаемости водного раствора протеина БСА [2]

$$\epsilon_w = 2.5 + \frac{75(1 - C \cdot 0.0013)}{1 + i19\pi f} + \frac{1.47}{1 + i0.46\pi f} + \frac{32}{28.09 - f^2 + i5.35f},$$

где f – частота излучения в ТГц, C – концентрация БСА в воде в г/л. В качестве других диэлектрических сред, формирующих сенсоры, рассмотрены ($\epsilon_a = 1$) и высокоомный кремний ($\epsilon_{Si} = (3.4 - i0.005)^2$). Представленные ниже численные данные относятся к представляющему практический интерес диапазону $0.1 \text{ ТГц} \leq f \leq 1 \text{ ТГц}$.

На рис. 1 приведены зависимости критериев (1) от угла падения излучения $\theta_{\text{вп}}^{\text{в}}$ на плоскую границу раздела сред воздух-сенсорная структура. Под $|\partial \rho / \partial C|$, $|\partial \varphi / \partial C|$ понимаются максимумы модулей величин (1) по частоте, рассчитанные при каждом значении θ . Согласно рис. 1, при измерениях C предпочтительно использовать волны ТМ поляризации. Для этих волн существуют две узких области углов падения в районе 64° и 80° , где чувствительность сенсора с кремниевой пленкой существенно превосходит чувствительность сенсора вида воздух-поверхность раствора. Детальное исследование этих областей показало, что в них имеются дискретные наборы углов Брюстера b , где модули критериев (1) обращаются в бесконечность. Однако ценой их резкого роста при $\theta \rightarrow b$ является сужение интервала частот, где этот эффект наблюдается. Это может породить проблемы с ТГц спектроскопией, поскольку разрешающая способность реальных спектрометров обычно не превосходит 0.001 ТГц. Преодоление данного ограничения возможно за счет огрубления чувствительности измерений путем некоторого отклонения угла θ от b . Например, при использовании угла $\theta = 64.5^\circ$ вместо $\theta = b = 64.422^\circ$, которому соответствуют $f = 0.25366$ ТГц, реализуются спектры $\rho(f)$, $\varphi(f)$, $|r_p^{(0)}|$, приведенные на рис. 2.

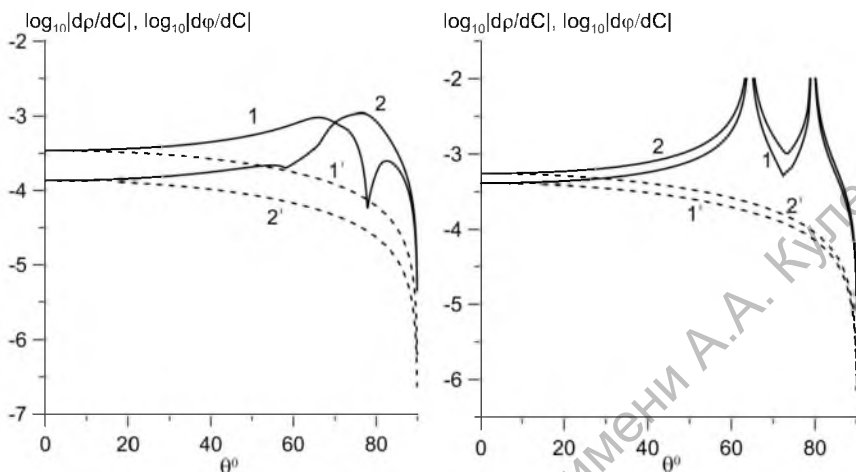


Рис. 1. Угловые зависимости критериев чувствительностей сенсоров водного раствора БСА: а – простейший сенсор вида воздух – раствор, б – сенсор вида воздух-пленка кремния толщиной 210 мкм – раствор. Сплошные кривые 1 – $|\partial\rho/\partial C|$, 2 – $|\partial\varphi/\partial C|$ для волн ТМ поляризации; штриховые кривые 1' и 2' – аналогичные кривые для волн ТЕ поляризации

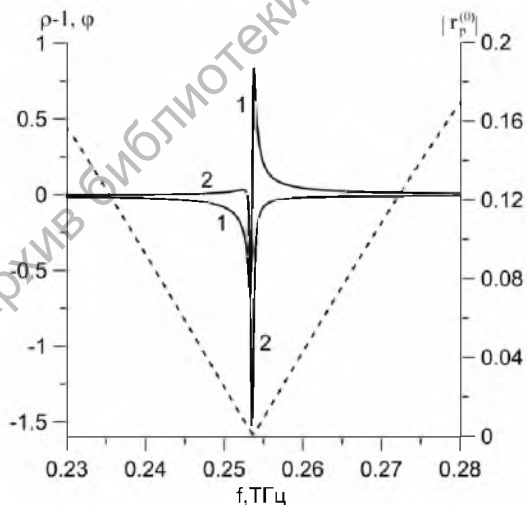


Рис. 2. Изменения модуля (1) и фазы (2) отношения коэффициентов отражения $r_p/r_p^{(0)}$ при увеличении концентрации БСА в воде от 0 до 10г/л Штриховая кривая – спектр $|r_p^{(0)}|$

Измерение данных спектров $\rho(f)$, $\varphi(f)$ с последующим определением S вполне осуществимы методом ТГц спектроскопии.

Представленные результаты позволяют преодолеть принципиальные проблемы, возникающие на пути обеспечения необходимой длины взаимодействия излучения с исследуемой средой, характерные для других известных типов ТГц сенсоров водных растворов.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (грант Ф18Р-143/1) и РФФИ (грант 15-52-0004).

Литература:

1. Characteristic responses of biological and nanoscale systems in the terahertz frequency range / A.A. Angeluts [et al.] // Quantum Electron. – 2014. – Vol. 44, № 7. – P. 614–632.
2. Nazarov, M.M. Study of the dielectric function of aqueous solutions of glucose and albumin by THz time-domain spectroscopy / M.M. Nazarov, O.P. Cherkasova, A.P. Shkurinov // Quantum Electron. – 2016. – Vol. 46, № 6. – P. 488–495.