

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАНАРНЫХ ПРОВОДЯЩИХ СРЕД МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ТЕРАГЕРЦОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ*

Д. С. Грибанов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

✉ d.gribanov@g.nsu.ru

Прогресс в сфере телекоммуникации, стимулируемый растущими требованиями к объему передаваемых данных в единицу времени, связан с переходом на все более высокие несущие и модуляционные частоты. Будущие поколения связи (например, 6G) будут работать в субтерагерцовом частотном диапазоне [1]. Развитие соответствующих технологий требует исследования диэлектрических характеристик применяемых материалов в данном спектральном диапазоне. Например, с точки зрения разработки субволновых ТГц-планарных волноводов требуется изучение проводимости наноразмерных металлических пленок [2] или изменение диэлектрических свойств кремния с ростом концентрации свободных носителей зарядов [3]. Еще более актуальными такие исследования выглядят на фоне сообщений о не соответствующем модели Друде поведении металлических пленок на ТГц-частотах [4] и исследований взаимодействия ТГц-излучения со свободными носителями зарядов, не учитывающих их пространственное распределение [5].

В данной работе изучены комплексные коэффициенты пропускания наноразмерных золотых пленок и кремниевой пластины, облучаемой лазером. Исследования проведены на широкополосном импульсном терагерцовом спектрометре [6].

Пропускание кремния на ТГц-частотах измерено через диафрагму диаметром 2 мм, помещенную на поверхность кремния и равномерно освещаемую лазерным излучением с длиной волны 532 нм при значениях мощности от 0 до 1300 мВт. Распределение зарядов в объеме было рассчитано с помощью численного моделирования. В результате показано, что концентрация носителей экспоненциально спадает по объему образца на порядок от значения $1,7 \times 10^{16}$ на поверхности кремния. При этом заряды распределены по объему, а не скапливаются у поверхностного слоя на глубине поглощения лазерного излучения, как иногда допускают для простоты анализа (рисунок а).

На основе экспериментальных данных была рассчитана комплексная диэлектрическая проницаемость рабочего объема кремния, и с помощью аппроксимации моделью Друде $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \omega_p^2 / (\omega(\omega + i\nu))$ определена зависимость плазменной частоты ω_p фотовозбужденных носителей зарядов от лазерной мощности, где $\varepsilon_{\infty} = 12,04$ — диэлектрическая проницаемость в ближнем ИК-диапазоне, ν — частота столкновений носителей зарядов. Поведение зависимости пропорционально корню из мощности, что хорошо соответствует ожиданиям (рисунок б).

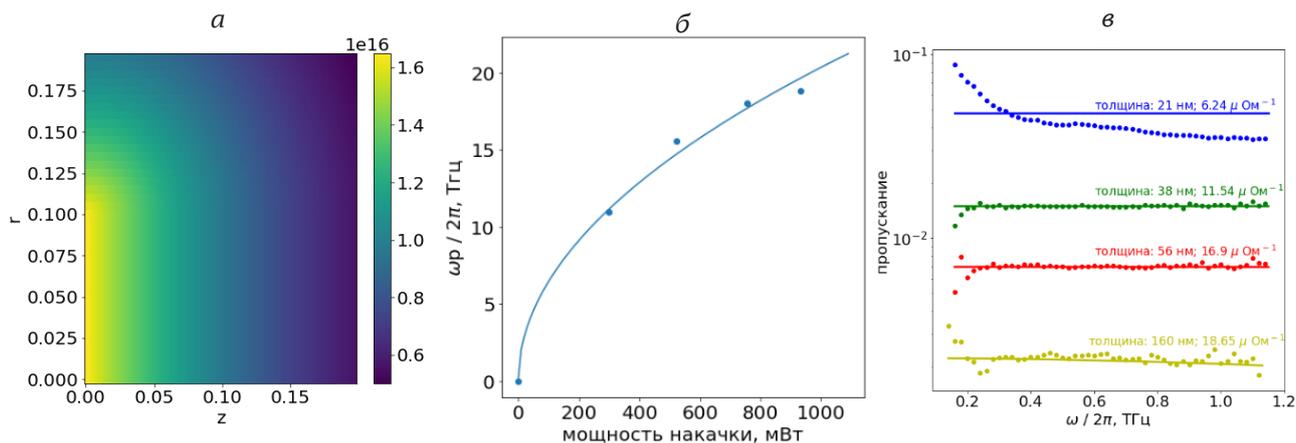
В работе также исследована зависимость проводимости золотых пленок от их толщины (от 21 до 160 нм) на кварцевых подложках. Полученные зависимости аппроксимировались с помощью приближения $n \approx (1 + i) \times (\sigma / 2\omega\varepsilon_0)^{1/2}$, которое связывает показатель преломления n на частоте $\omega/2\pi = f \sim 1$ ТГц и проводимость на постоянном токе σ (рисунок в) аналогично

* Автор благодарит ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН за предоставленное научное оборудование.

© Д. С. Грибанов, 2023

работе [7]. Проводимости пленок имеют значения, схожие с теми, которые приведены в статье [7] для золота. Было установлено, что для пленки толщиной 21 нм проводимость плохо аппроксимируется выбранной моделью, что, видимо, связано с зернистостью пленки, особенно проявляющейся для более тонких образцов.

В работе подтверждено, что проводимость на ТГц-частотах золотых пленок с толщинами менее 30 нм не описывается общепринятой моделью, что необходимо учитывать при разработке волноводных структур и интегральных устройств. Также нами показана важность учета объемного распределения фотовозбужденных носителей зарядов в кремнии при разработке устройств модуляции и управления ТГц-излучением на основе оптической накачки.



Распределение фотовозбужденных носителей заряда в образце кремния в полярных координатах (а); зависимость плазменной частоты фотовозбужденных носителей заряда от мощности накачки (б); пропускания тонких золотых пленок в ТГц-диапазоне при различной толщине образцов (в)

Список литературы

1. Sub-terahertz communication in 6G. URL: <https://www.ericsson.com/en/6g/sub-terahertz-communication> (дата обращения: 23.07.2023).
2. Garcia-Vidal F. J. et al. Spoof surface plasmon photonics // *Reviews of Modern Physics*. 2022. Vol. 94. № 2. P. 025004.
3. Andrews S. R. Microstructured terahertz waveguides // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2014. Vol. 47. № 37. P. 374004.
4. Pandey S. et al. Non-Drude like behaviour of metals in the terahertz spectral range // *Advances in Physics: X*. 2016. Vol. 1. № 2. P. 176–193.
5. Li J. et al. Broadband and tunable terahertz absorption via photogenerated carriers in undoped silicon // *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*. 2022. Vol. 65. №. 1. P. 214211; Okada T., Tanaka K. Photo-designed terahertz devices // *Scientific reports*. 2011. Vol. 1. № 1. P. 121.
6. Rybak A. et al. Terahertz Optical Properties of KTiOPO_4 Crystal in the Temperature Range of (-192) – 150 C // *Crystals*. 2021. Vol. 11. № 2. P. 125.
7. Laman N., Grischkowsky D. Terahertz conductivity of thin metal films // *Applied Physics Letters*. 2008. Vol. 93. № 5.