

## Особенности определения оптических параметров с помощью терагерцового спектрометра с временным разрешением на основе терагерцового эмиттера InAs

© В.Н. Трухин

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: valera.truchin@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 2026 г.

В окончательной редакции 2026 г.

Принята к публикации 2026/г.

Представлена методика, позволяющая учесть интерференционные явления в терагерцовом эмиттере InAs, эпитаксиальная пленка которого синтезируется на подложке полуизолирующего GaAs, и достичь более высокого частотного разрешения при спектральном анализе. Для верификации методики проведены экспериментальные исследования пропускания терагерцового излучения образцов кремния и прессованных таблеток на основе порошка полиэтилена и смеси магнитных наночастиц  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , покрытых слоем  $\text{SiO}_2$  и глюкозы, выполненные с помощью терагерцового спектрометра с временным разрешением на базе терагерцового эмиттера InAs, и выполнен расчет оптических параметров исследуемых образцов.

**Ключевые слова:** время-разрешенная терагерцовая спектроскопия, кремний, наночастицы, спектры кремния, InAs, терагерцовое излучение.

DOI: 10.61011/OS.2026.09.63813.8882-26

### Введение

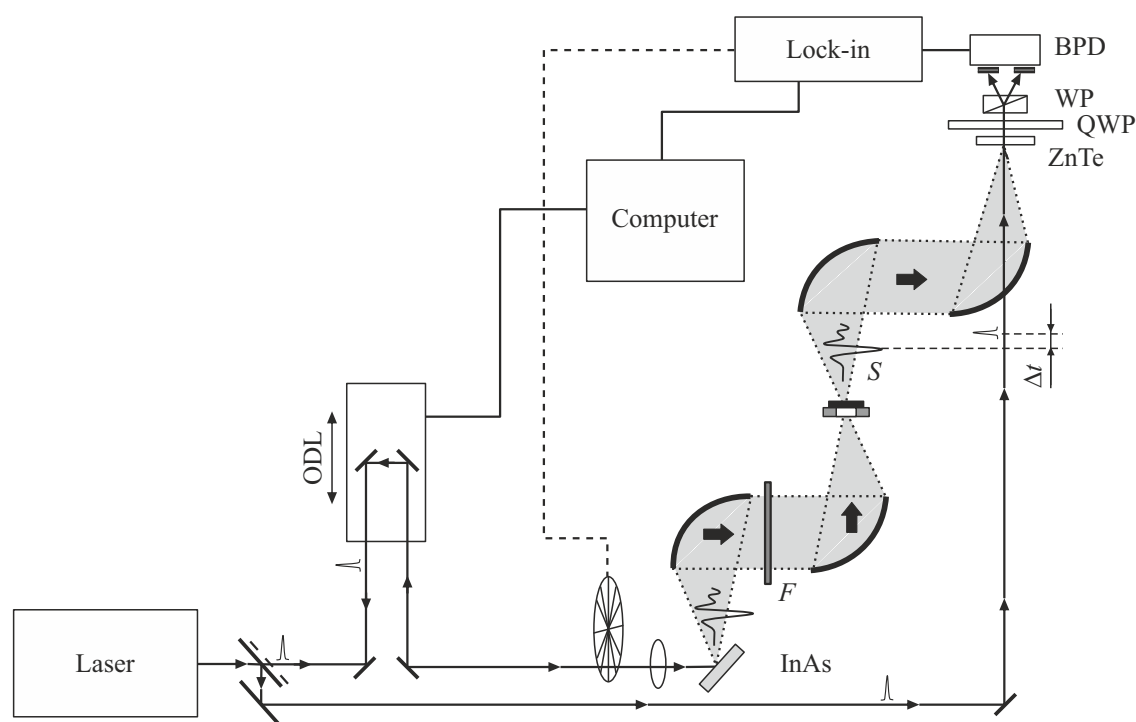
С появлением фемтосекундных лазеров терагерцовая (ТГц) спектроскопия получила новые возможности для исследования оптических свойств ряда веществ. Ключевым достижением стало создание компактных ТГц-спектрометров с временным разрешением, функционирующих при комнатной температуре [1]. Эти приборы позволяют напрямую определять фундаментальные оптические параметры сред, таких как комплексный показатель преломления, который включает действительную часть — показатель преломления ( $n$ ) и мнимую часть, связанную с показателем поглощения ( $\alpha$ ). Совершенствование ТГц-спектрометров, а именно, создание эффективных эмиттеров и чувствительных детекторов, позволяет расширить как частотный диапазон, так и разрешение этих приборов. Отметим, что реализация этих параметров зависит не только от приборного исполнения, но и от самих параметров образцов [2]. В настоящей работе описана методика, позволяющая увеличить временной интервал регистрируемой волновой формы основного ТГц-импульса, на котором отсутствуют импульсы, обусловленные интерференционными процессами внутри эмиттера, что позволило реализовать частотное разрешение ТГц-спектрометра. Для подтверждения функциональности разработанной методики выполнены экспериментальные исследования пропускания ТГц-излучения для двух типов образцов: пластинок монокристаллического кремния и прессованных таблеток на основе порошка полиэтилена и смеси магнитных наночастиц  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , покрытых слоем  $\text{SiO}_2$  и глюкозы.

Измерения проводились на ТГц-спектрометре с временным разрешением, в котором излучение генерировалось эмиттером на основе эпитаксиальной пленки InAs, синтезированной на полуизолирующей подложке GaAs. На основе разработанной методики проведен расчет оптических параметров исследуемых образцов.

### Образцы и методика эксперимента

Измерения волновых форм ТГц-импульсов, прошедших через образцы, проводились с использованием экспериментальной установки ТГц-спектрометра с временным разрешением (рис. 1). Источником излучения, которое использовалось для генерации ТГц-излучения и его детектирования, служил титан-сапфировый лазер, генерирующий оптические импульсы с длительностью  $\sim 15$  fs, длиной волны 800 nm, частотой повторения импульсов 80 MHz и средней мощностью  $\sim 0.65$  W. Основной оптический импульс линейно поляризованного лазерного излучения делился на два с помощью светоделительной пластинки. Первый световой импульс (накачка) использовался для генерации терагерцового излучения, второй импульс (пробный) служил для регистрации амплитуды и фазы терагерцового излучения. Когерентное ТГц-излучение генерировалось при возбуждении оптическим импульсом накачки эпитаксиальной пленки InAs, выращенной на подложке полуизолирующего GaAs [3].

Оптический импульс накачки проходит через линию оптической задержки ODL, которая позволяет регистрировать волновую форму терагерцового импульса. Ком-



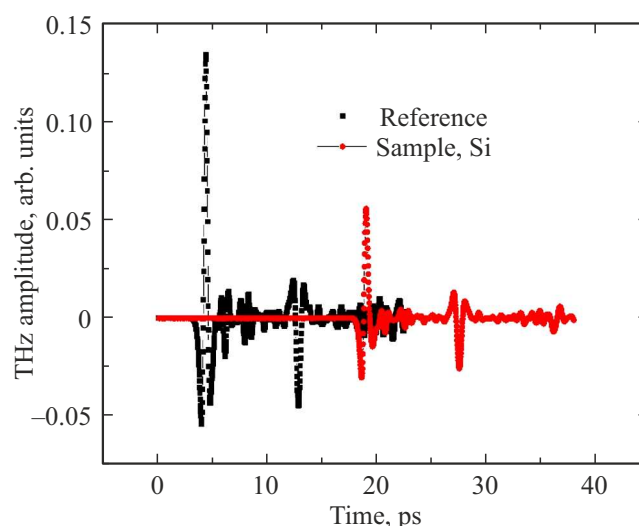
**Рис. 1.** Экспериментальная установка. ТГц спектрометр с временным разрешением:  $S$  — образцы,  $F$  — черный фильтр из полиэтилена, ODL — оптическая линия задержки, QWP — четвертьволновая пластинка, WP — призма Волластона, BPD — балансный фотодетектор, лазер — Ti/сапфировый лазер.

плиментарная пара внеосевых параболических зеркал использовалась для формирования параксиального пучка ТГц-излучения и фокусировки его на детектор. Детектирование ТГц-излучения осуществлялось с помощью метода электрооптического стробирования. В качестве детектора использовался кристалл ZnTe толщиной 1 mm. В электрооптическом кристалле вследствие взаимодействия поля ТГц-волны с пробным световым пучком происходит изменение поляризации пробного пучка, которое детектируется с помощью оптической схемы, включающей четвертьволновую пластинку  $\lambda/4$ , призму Волластона WP и фотодиодного балансного детектора BPD. Временной профиль ТГц электрического поля получался путем формирования зависимости сигнала с балансного детектора от временной задержки между импульсом накачки и пробным импульсом. Установка ТГц-спектрометра функционировала при комнатной температуре.

В качестве образцов использовались пластины высокоомного кремния толщиной 1.84 mm, а также пресованные таблетки на основе порошка полиэтилена и смеси магнитных наночастиц  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , покрытых слоем  $\text{SiO}_2$  и глюкозы [4].

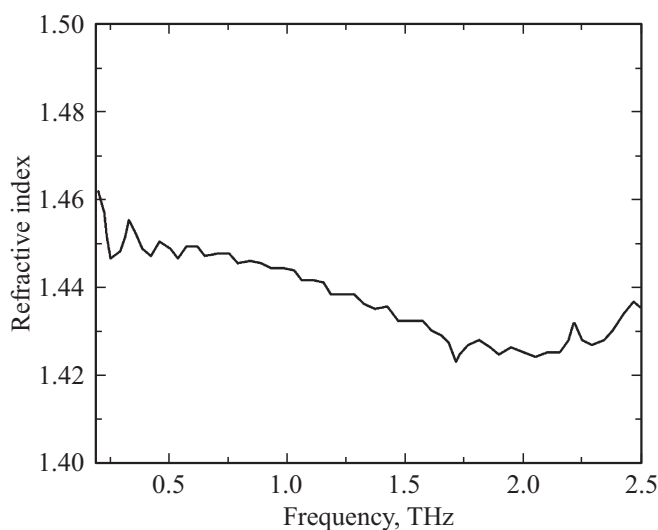
## Результаты и обсуждение

В ходе эксперимента были зарегистрированы волновые формы, представляющие зависимость амплитуды

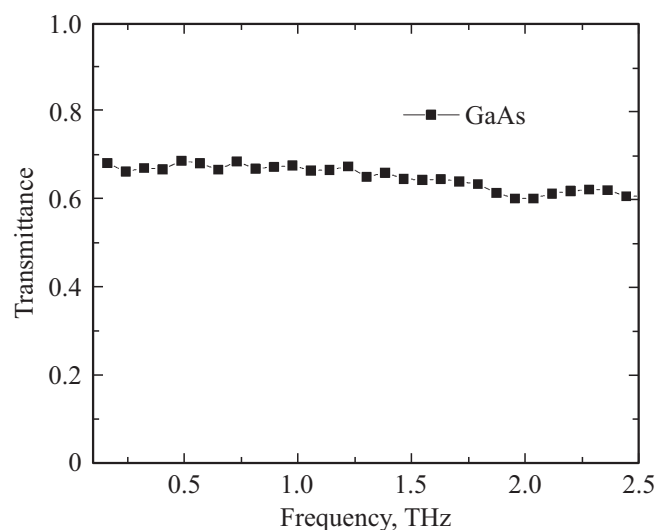


**Рис. 2.** Волновая форма ТГц-импульса, прошедшего в свободном пространстве и через образец кремния.

ТГц-сигнала от временной задержки между импульсом накачки и пробного импульса. Эти волновые формы были получены для ТГц-импульсов, прошедших через исследуемые образцы и через свободное пространство (рис. 2). Для получения спектральных компонент терагерцового поля было использовано быстрое преобразование Фурье (БПФ) [5]. С использованием части ре-



**Рис. 3.** Спектр показателя преломления образца полиэтилена с наночастицами  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , рассчитанный без использования предложенной методики.

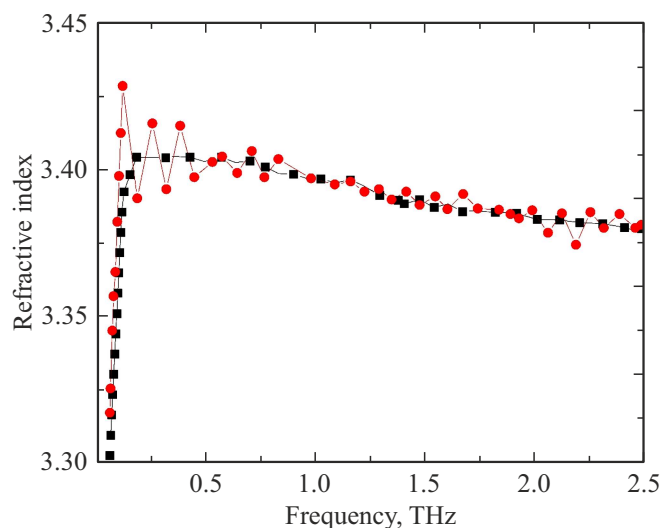


**Рис. 4.** Спектр коэффициента пропускания пластинки полупроводящего GaAs.

зультатов БПФ (спектральные амплитуда и фаза) были рассчитаны коэффициент преломления и поглощения, при этом использовались результаты, полученные при регистрации ТГц-импульса, прошедшего как в свободном пространстве, так и через образец.

В силу специфики технологии роста эпитаксиальной пленки синтез InAs осуществлялся на подложке полупроводящего GaAs, который обладает хорошим пропусканием в терагерцовом диапазоне частот. ТГц-излучение, генерируемого эмиттером, представляло последовательность импульсов (рис. 2). На волновой форме ТГц-импульса, прошедшего через свободное пространство, наблюдался второй пик, имеющий отрицательную амплитуду. Наличие этого второго ТГц-импульса обусловлено отражением от границы между подложкой и держателем эмиттера ТГц-излучения, генерируемого в прямом направлении. Соответственно, использование временного окна, протяженностью большего, чем временной интервал между первым и вторым импульсом, приводило к появлению синусоидальных биений в спектре. Типичный пример приведен для спектра показателя преломления образца полиэтилена с наночастицами  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  на рис. 3.

Для устранения вклада этой интерференции производилось сложение исходной волновой формы и волновой формы, полученной путем временного смещения исходной волновой формы на интервал, равный времени распространения ТГц-импульса через двойную толщину подложки GaAs, на которой был выращен слой InAs. Амплитуда преобразованной волновой формы нормировалась с учетом уменьшения амплитуды второго импульса. Таким образом получались волновые формы ТГц-импульсов, прошедших как через свободное пространство, так и через образец, без наличия ТГц-импульса, обусловленного отражением ТГц-импульса, генерируемого в прямом направлении. Такое прибли-



**Рис. 5.** Спектр показателя преломления Si, рассчитанный с использованием предложенной методики (черная кривая — ■) и без использования методики (красная кривая — ○).

жение волновой формы ТГц-импульса допустимо, так как пропускание пластинки полупроводящего GaAs слабо зависит от частоты в исследуемом терагерцовом диапазоне (рис. 4).

Временной интервал для преобразования Фурье выбирался до момента появления второго ТГц-импульса, связанного с отражением ТГц-волны от поверхностей образца. Возможный уход начального уровня сигнала балансного фотодетектора устранялся с помощью интегрирования волновой формы и определения параметра сдвига волновой формы по амплитуде для получения нулевого значения самого интеграла волновой формы.

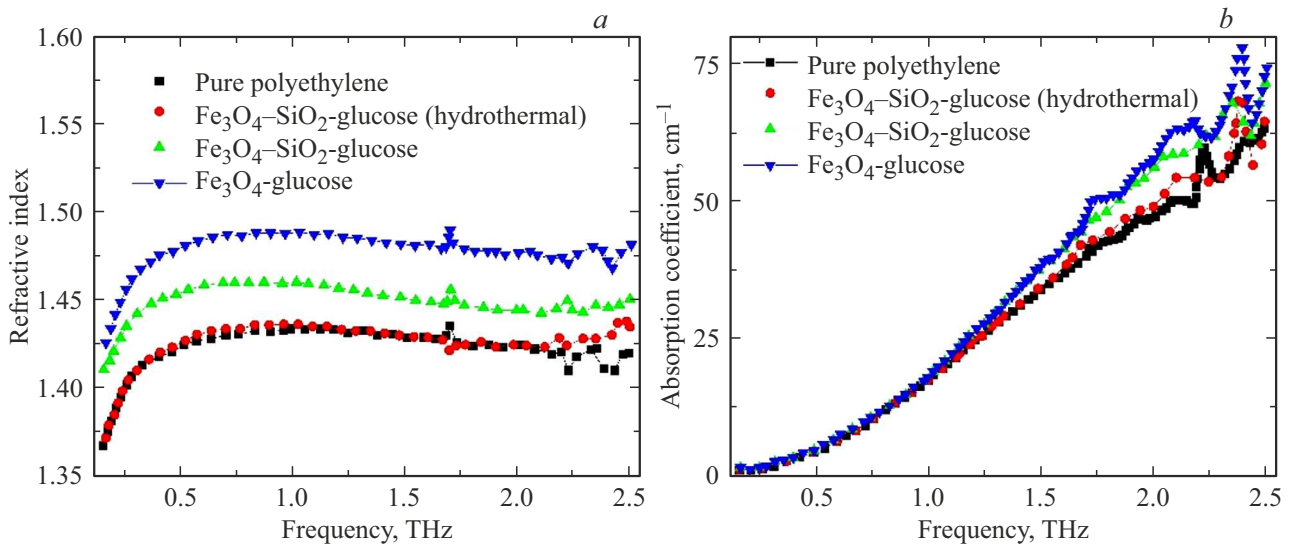


Рис. 6. Спектры показателя преломления и коэффициента поглощения образцов на основе смеси полиэтилена и  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

Таким образом были скорректированы волновые формы ТГц-импульсов для дальнейшего получения комплексного значения спектральной амплитуды ТГц-импульса путем преобразования Фурье. При расчетах использовались зависимости амплитуды  $A(\omega)$  и фазы  $\varphi(\omega)$  от частоты. В итоге были рассчитаны следующие зависимости:  $A^{\text{ref}}(\omega)$ ,  $\varphi^{\text{ref}}(\omega)$ ,  $A^{\text{sam}}(\omega)$ ,  $\varphi^{\text{sam}}(\omega)$ .

Так как спектральные зависимости фаз имели различные значения при нулевой частоте, была проведена корректировка. Корректировка осуществлялась с помощью линейной аппроксимации и смещения по величине фазы.

Расчеты были основаны на использовании формул для пропускания электромагнитного излучения через поглощающую среду в виде пластины толщиной  $d$  [6]. Для отношения комплексных амплитуд ТГц-поля импульса, прошедшего через образец и свободное пространство, можно получить следующее соотношение:

$$\frac{E_{ex}^s}{E_{ex}^r} = \frac{4\tilde{n}}{(\tilde{n}+1)^2} \frac{1}{\left(1 - \frac{(\tilde{n}-1)^2}{(\tilde{n}+1)^2} e^{i2kd}\right)^2} e^{ik\tilde{n}d - \frac{\omega}{c}d}, \quad (1)$$

где  $k = \frac{\omega}{c}$  — волновой вектор,  $\tilde{n} = (n + i\chi)$  — комплексный показатель преломления,  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота,  $d$  — толщина образца.

Так как был выбран временной интервал, на котором находится только первый импульс и нет ТГц-импульсов, связанных с отражением ТГц-волны от поверхностей образца, формула (1) упрощается (в ней остается только первый член от разложения второго множителя) и она переходит в следующее соотношение:

$$\frac{E_{ex}^s}{E_{ex}^r} = \frac{A_{ex}^s}{A_{ex}^r} e^{\varphi^s - \varphi^{ref}} = \frac{4\tilde{n}}{(\tilde{n}+1)^2} e^{ik\tilde{n}d - \frac{\omega}{c}d}, \quad (2)$$

где  $A_{ex}^s = |E_{ex}^s|$ ,  $A_{ex}^r = |E_{ex}^r|$ .

Из формулы (2) видно, что аналитические выражения для  $n$  и  $\chi$  от величин  $\frac{A_{ex}^s}{A_{ex}^r}$  и  $(\varphi^s - \varphi^{ref})$  отсутствуют. Для

сред, имеющих коэффициент поглощения  $\alpha < 100 \text{ cm}^{-1}$  в терагерцовом диапазоне ( $f \sim 1 \text{ ТГц}$ ), выполняется соотношение  $n/\chi \sim 0.03$ . Это позволяет в первом приближении считать в первом сомножителе в формуле (2)  $\tilde{n} = n$ . В результате для спектральных амплитуд и фаз, соответственно, получаются следующие соотношения:

$$\frac{A_{ex}^s}{A_{ex}^r} = \frac{4n}{(n+1)^2} e^{-\frac{\omega}{c}\chi d} \quad (3)$$

$$\varphi^s - \varphi^{ref} = \frac{\omega}{c}nd - \frac{\omega}{c}d. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует соотношение для показателя преломления:

$$n = \frac{(\varphi^s - \varphi^{ref})c}{2\pi d f} + 1 \quad (5)$$

Зная показатель преломления и учитывая, что  $\frac{\omega}{c}\chi = \frac{\alpha}{2}$ , можно рассчитать поглощение образца из формулы (3)

$$\alpha = \frac{2}{d} \ln \left( \frac{4n E^{ref}}{(n+1)^2 E^s} \right). \quad (6)$$

В итоге, на основе полученных экспериментальных результатов, были рассчитаны частотные зависимости показателя преломления и коэффициента поглощения для исследуемых образцов: Si (рис. 5), полиэтилен с  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (рис. 6, *a, b*). Хорошо видно, что проявление изменений в спектре (периодические биения), обусловленных интерференцией, отсутствует.

## Заключение

В ходе работы было исследовано пропускание терагерцового излучения через образцы кремния и таблеток, состоящие из смеси полиэтиленового порошка

с магнитными наночастицами, покрытых слоем  $\text{SiO}_2$  и глюкозы. Были получены спектральные зависимости коэффициентов преломления и поглощения.

Используя в исследуемой работе разработанную методику, удалось избавиться от интерференционных явлений, связанных с отражением ТГц-импульса от поверхности подложки, граничащей с держателем эмиттера. Данный метод позволяет скорректировать при анализе и расчете оптических констант влияние работы самого ТГц-эмиттера на основе эпитаксиальных пленок InAs, выращенных на прозрачных для ТГц-излучения подложках. Следует заметить, что для ТГц-эмиттера на основе InAs, синтезированного на подложке сильно легированного полупроводника, например GaAs, необходимость применения данной методики отпадает, так как отражение сгенерированного в прямом направлении терагерцового излучения происходит на границе InAs-GaAs, что практически увеличивает ТГц-импульс в два раза (ТГц-генерация от такого излучателя была описана в работе [7]).

### Благодарности

Автор выражает благодарность Смолянской О.А. за представленные образцы полиэтилена с наночастицами  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Государственного задания, тема „Исследования электрических, оптических, фотоэлектрических и магнитных явлений квантовой природы в полупроводниковых и полимерных материалах и структурах“ (FFUG-2024-0016).

### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

### Список литературы

- [1] P.U. Jepsen, D.G. Cooke, M. Koch. *Laser Photonics Rev.*, **5**, 124 (2011). DOI: 10.1002/lpor.201000011
- [2] M. Naftaly. *Terahertz metrology* (Artech House, 2015).
- [3] A.V. Andrianov, A.N. Aleshin, V.N. Truchin, A.V. Bobylev. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **44**, 265101 (2011). DOI: 10.1088/0022-3727/44/26/265101
- [4] O.A. Smolyanskaya et al. *Proc. SPIE*, **10892**, 108920L (2019). DOI: 10.1117/12.2506870
- [5] A.G. Davies, A.D. Burnett, Wenhui Fan, E.H. Linfield, J.E. Cunningham. *Materials Today*, **11**(3), 18 (2008). DOI: 10.1016/S1369-7021(08)70016-6
- [6] М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики* (Наука, М., 1973).
- [7] В.Н. Трухин, В.А. Соловьев, И.А. Мустафин, М.Ю. Чернов. *ПЖТФ*, **48**(3), 51 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.03.51985.19051