**Модифицированные формулы Френеля в случае наклонного падения излучения на изотропную нелинейную среду**

***Дюков В. А.1, Григорьев К. С.2, Макаров В. А.3***

1аспирант,2к.ф.-м.н., 3д.ф.-м.н.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,*

*физический факультет, Москва, Россия*

*E–mail:* [*diukov.va16@physics.msu.ru*](mailto:zinenko.as@mail.ru)

Формулы, связывающие амплитуды преломленной и отраженной световых волн с амплитудой падающей, были получены в начале девятнадцатого века Огюстеном Жаном Френелем [1] и носят его имя. Практическое применение этих соотношений обеспечило создание просветляющих покрытий и устройств волоконной оптики, фотоаппаратуры, рефрактометрии, а также конструирование многоуровневых оптических систем [2, 3]. Вне всякого сомнения, формулы Френеля, полученные для изотропных сред в приближении резкой плоской границы раздела между ними, обеспечили окончательное решение значительной части задач линейной и нелинейной оптики, связанных с взаимодействием падающего излучения со средой [4].

Однако классические формулы Френеля в ряде важных случаев нуждаются в существенном качественном уточнении. Например, авторы работы [5] показали, что их использование не обеспечивает корректную запись закона сохранения энергии, связывающего амплитуды падающей, отраженной и прошедшей волн на границе раздела изотропных поглощающих сред, и привели модифицированную версию формул Френеля, исправляющую эту ситуацию. Классические формулы Френеля также нельзя применять, когда хотя бы одна из двух сред, через границу между которыми распространяется излучение, демонстрирует оптическую активность, поскольку они не принимают во внимание влияние на отражение и преломление света тонкого приповерхностного слоя, симметрия которого отличается от симметрии толщи среды.

В настоящем исследовании в рамках классической электродинамики с использованием модифицированных граничных условий получены формулы Френеля, описывающие в плосковолновом приближении связь между амплитудами падающей, отраженной и преломленной волн на поверхности непоглощающей изотропной гиротропной среды (группа симметрии ∞∞), одновременно учитывающие влияние как тонкого приповерхностного слоя (группа симметрии ∞), так и нелокальности оптического отклика толщи среды на внешнее световое поле с точностью до линейных слагаемых. В базисе циркулярно поляризованных волн записаны выражения для напряженности электрического поля падающей, отраженной и преломленной волны с учетом влияния пространственной дисперсии и модифицированных граничных условий. Полученные модифицированные формулы Френеля позволили нам найти интенсивность, степень эллиптичности эллипса поляризации и угол, задающий ориентацию эллипса поляризации отраженной волны, а также интенсивности двух циркулярно поляризованных волн, распространяющихся под различными углами в изотропной гиротропной среде. Показано, что найденные модифицированные формулы Френеля переходят в классические формулы Френеля, если пренебречь влиянием тонкого приповерхностного слоя и оптической активностью. Подробно рассмотрены важные для практических применений частные случаи: нормальное падение излучения, наклонное падение излучения на изотропную негиротропную среду (группа симметрии ∞∞m). Получены и качественно описаны зависимости степени эллиптичности эллипса поляризации и нормированной интенсивности падающей и прошедшей волны от угла падения циркулярно поляризованного излучения на изотропную нелинейную среду. Показано, что для корректной записи закона сохранения углового момента в случае наклонного падения светового пучка на изотропную нелинейную среду необходимо учитывать поперечные смещения центров масс отраженного и прошедшего в среду пучков, а также использовать модифицированный вид закона сохранения энергии.



Таким образом, в результате исследования получены модифицированные формулы Френеля для наклонного падения плоских эллиптически поляризованных электромагнитных волн на плоскую границу непоглощающей изотропной гиротропной среды, учитывающие влияние приповерхностной неоднородности вещества. Показано, что учет оптической активности среды и ее приграничного слоя приводит к существенным отличиям в зависимостях параметров, характеризующих интенсивность и состояние поляризации отраженных и прошедших волн, от аналогичных параметров падающих волн, полученных в случае пренебрежения пространственной дисперсией и отличием симметрии приповерхностного слоя от симметрии толщи среды, т.е. классических формул Френеля.

**Литература**

1. Fresnel A. et al. Oeuvres compl`etes d’Augustin Fresnel // Impr. Imp´eriale (1866).
2. Born M., Wolf E. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light // Pergamon Press, Oxford, UK, 6th edition (1980).
3. Xie Y. et al. The “Fresnel Equations” for Diffuse radiation on Inclined photovoltaic Surfaces (FEDIS) // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 161:112362 (2022).
4. Busson B. Sum-Frequency Generation at interfaces: a Fresnel story I. Designing high contrast in two interface systems // JCP, 159 (2023).
5. Maezawa H., Miyauchi H. Rigorous expressions for the Fresnel equations at interfaces between absorbing media // JOSA A, 26:330–6 (2009).