CALCULATION OF THE REFRACTIVE INDEX BASED ON WAVELENGTH AND CONCENTRATION OF GeO_2 DOPANT IN SILICA OPTICAL FIBERS.

Angel Z. Toshkov

Abstract: In this publication, we proposed a general formula for calculating the refractive index of two-component material based on SiO2 and GeO2-doped. The article is suitable for practical purposes, as well as for the students' training for calculation of the refractive index and the concentrations of the dopants in the optical fibers intended for the communications.

Keywords: refractive index, dopant, additives, wavelength, calculation

ИЗЧИСЛЯВАНЕ НА КОЕФИЦИЕНТА НА ПРЕЧУПВАНЕ ВЪЗ ОСНОВА НА ДЪЛЖИНАТА НА ВЪЛНАТА И КОНЦЕНТРАЦИЯТА НА GeO_2 В СИЛИЦИЕВИ ОПТИЧНИ ВЛАКНА.

Ангел З. Тошков

Абстракт: В тази публикация е предложена обща формула за пресмятане на коефициента на пречупване на двукомпонентен материал базиран на SiO_2 и легиран с GeO_2. Статията е подходяща за практико-приложни цели, както и при обучението на студенти за пресмятане на коефициента на пречупване о концентрациите на легиращ материал при изграждане на ядрата и обвивките на оптични влакна предназначени за комуникациите.

Ключови думи: коефициент на пречупване, легиращи добавки, дължина на вълната, пресмятане.

I. Въведение

В публикацията е предложена обобщена формула за пресмятане на коефициента на пречупване на двукомпонентен материал базиран на SiO2 и легиран с GeO2. Тя е подходяща за практико-приложни цели, както и при обучението на студенти при проектиране на параметрите на ядрата и обвивките на оптични влакна предназначени за комуникациите.

Съвременните оптични влакна се изграждат от множество слоеве, които имат различаващ се коефициент на пречупване. Посредством последователното изграждане на всеки един слой поотделно се моделира предварително зададен, сложен профил на коефициента на пречупване, който да отговаря най-добре на поставените към влакното изисквания. За пресмятане на коефициента на пречупване n_i на всеки отделен слой от влакното може да бъде използвана формулата на Sellmeier валидна за двукомпонентни силициеви (SiO_2) стъкла. По-долу са дадени примери за пресмятане на коефициента на пречупване на единичен двукомпонентен слой за оптични влакна, изградени на основата на силициев двуокис, легирани с германиев двуокис.

При легиране на материала за изграждане на отделните слоеве на ядрото на оптичното влакно е възможно използването на повече от една легираща добавка. Най-често се използва легиране на всеки отделен слой с един легиращ материал. Отделните слоеве се легират с различни обемни количества добавка, с което се постига необходимият коефициент на пречупване, преизчислен за съответната работна дължина на вълната. В някои случаи броят на тези слоеве може да достигне стотици и дори хиляди. По същия начин се легира и материалът за обвивката с тази разлика, че той е хомогенен и с еднакъв коефициент на пречупване n_2. Обикновено, при съвременните методи, ядрата се изграждат по метода на вътрешно отлагане от парова фаза, при което е възможен прецизен контрол на легиращите добавки.

За пресмятане на коефициента на пречупване n на всеки отделен слой от влакното може да бъде използвана формулата на Sellmeier даваща емпирична връзка между коефициента на пречупване и дължина на вълната за конкретна прозрачна среда,

$$n = \sqrt{1 + \sum_{i=1}^{3} \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2}}$$

В тази формула n е коефициентът на пречупване на средата, λ е дължината на вълната (във вакуум), A_i и λ_i (в μm) са експериментално определени коефициенти на Sellmeier, λ е дължината на вълната за която се прави изчислението.

Уравнението се използва за определяне на някои от важните параметри на оптичните влакна като дисперсията на светлината в средата, групово време на закъснение, групов коефициент на пречупване и други.

Коефициентите необходими за пресмятане по формулата на Sellmeier обикновено са представени в табличен вид за различните. Резултатите са валидни за видимата и близката инфрачервена област при дължините на светлинните вълни λ от 0.4 ~ 1.8μм.

Познаването на зависимостите и тенденциите на промяна на коефициента на пречупване дава възможност за проектиране на оптични влакна със сложен профил на ядрото. Визуалното представяне на изчислителните резултати помага за по-лесно възприемане на тези тенденции, а тяхното познаване е задължително при съвременните оптични влакна, тъй като изискванията по отношение на техните експлоатационни параметри са високи.

II. Подбор и обработка на данните и анализ резултатите[1,4533317]

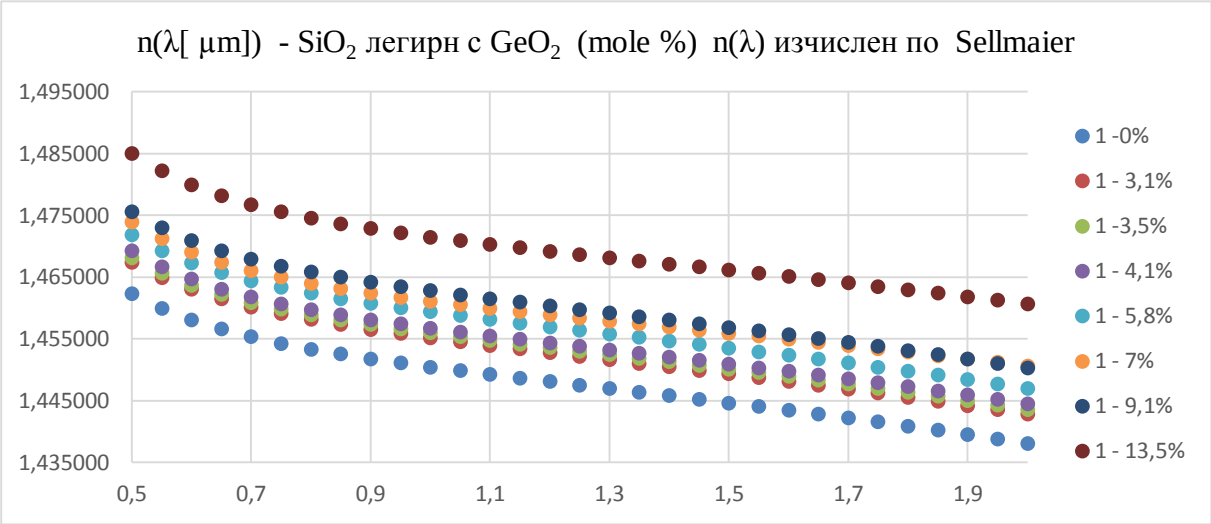
Осигурени са подходящи данни, които в последствие са обработим и анализирани. В случая ни е необходима информация за коефициентите на Sellmeier за различни материали, използвани за изграждане на ядрото и обвивката на оптични влакна.

Към момента има направени голям брой изследвания и експерименти, данните от които са достъпни за обработка. Избрани са няколко източника и справочни масива за данни, публикувани в [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8],[9].

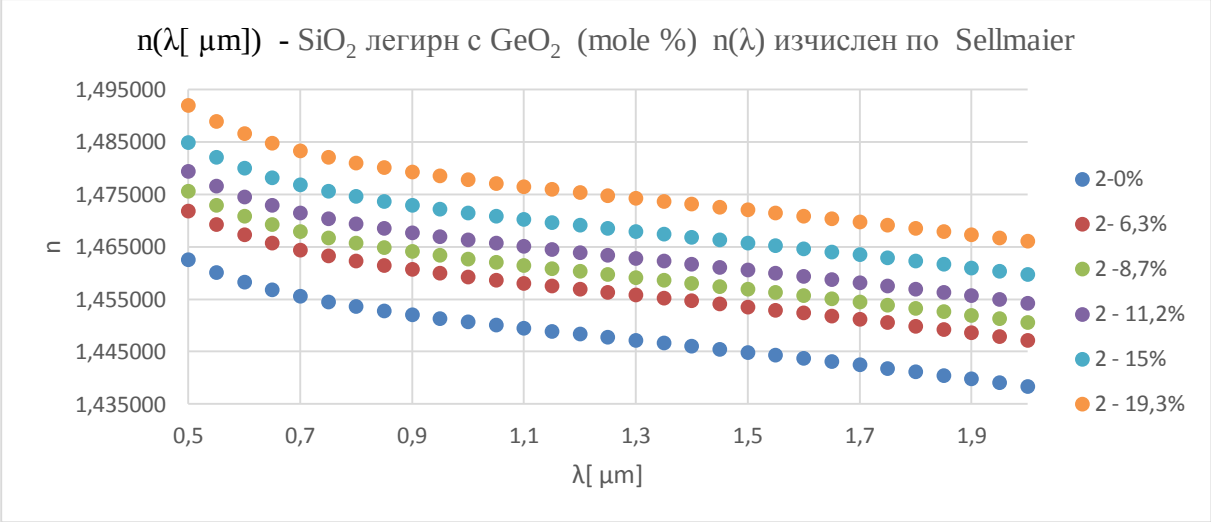
Източниците са избрани поради това, че в тях има достатъчно информация за обработка и провеждане на анализ, а в [3] и [6] са направени и подобни изследвания.

Трябва да се обърне внимание на фактът, че различните автори, публикувайки данни за коефициентите на Sellmeier в някои случаи дават стойностите на λ_i в μm, а в други случаи в μm^2 в следствие на което понякога се налага преизчисляване. Анализът на данните в [1] - Табл. 3 от Приложение 1, данните в [6] – Табл. 2 от Приложение 1 и данните в [3] - Табл. 1 от Приложение 1 можем да добием представа за характера на връзката $n(\lambda)$ за

различни образци на стъкла от SiO_2, легирани с GeO_2, P_2O_5, B_2O_3, F, TiO_2 и други легиращи материали. Въз основа на данните от [1], са получени следните резултати, показани на фиг. 1 и фиг. 2



Фиг. 1 Данни за образец 1 [1].

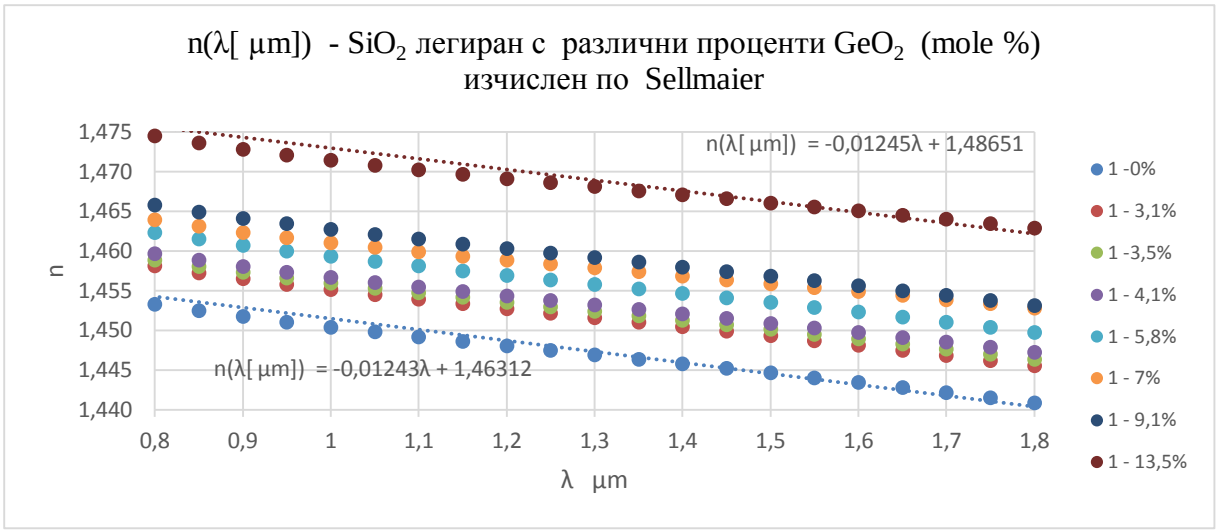


Фиг. 2 Данни за образец 2 [1].

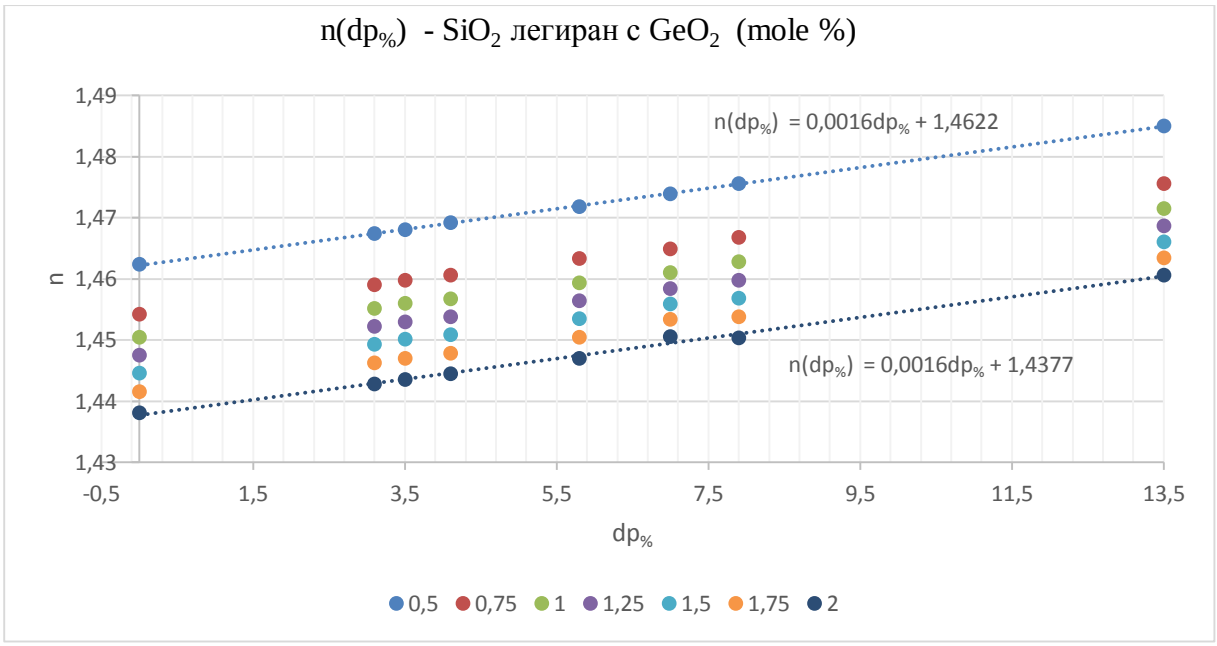
На графиките се очертава зависимостта на коефициента на пречупване n от дължината на вълната λ, като характера на кривите се запазва при различните проценти на легиране. На фиг. 3 е представена извадка от фиг. 1, в диапазона на дължини на вълните от 0.8 µm до 1,8 µm. Фиг. 3. От фигурата се вижда, че е възможно да се използва линейна апроксимация за връзката n(λ) за този диапазон.

На фиг. 4 е представена зависимостта на $n(dp_{\%})$ при легиране на SiO_2 с GeO_2 (mole %) от 0% до 13,5% (данните са за образец 1 – Табл. 3 от Приложение 1). Тук отново се забелязва линейното нарастване на коефициента на пречупване като функция на $dp_{\%}$ - количеството добавен легиращ материал - GeO_2 (mole %),

На фигури 3 и 4 са показани и апроксимационните формули за някои от сериите в диапазона за λ от 0,8 – 1,8 µm. Както се забелязва, за всяка една от графиките тези формули са много близки. Разликите в тях се дължат на емпиричният характер на получените коефициенти за формулата на Sellmaier и



Фиг.3 Зависимост на n(λ) - SiO_2 легиран с GeO_2 (mole %) за диапазона на дължини на вълните от 0.8 µm до 1,8 µm.



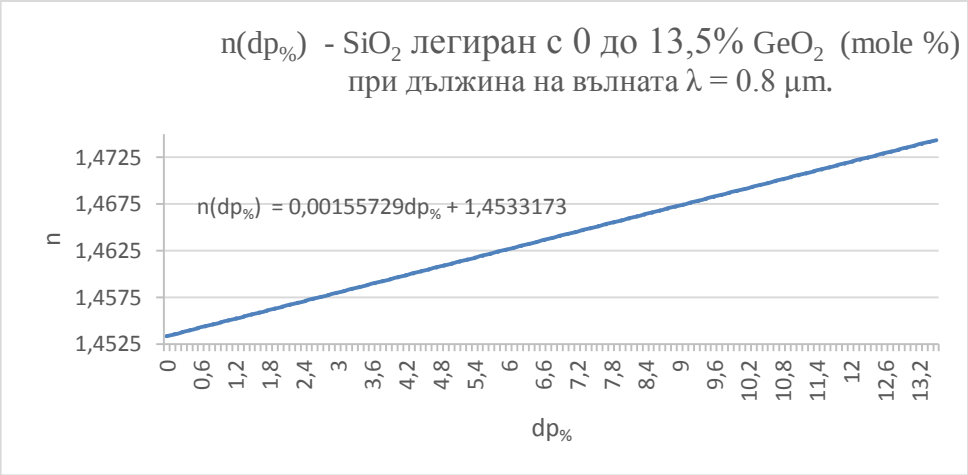
Фиг. 4. Зависимост на n(dp%) - SiO_2 легиран с GeO_2 (mole %) за процент на легиране на SiO_2 легиран с GeO_2 (mole %) от 0% до 13,5%

Нека да направим коментар на получените до тук резултати. Апроксимационната формула на фиг. 3 за серията при легиране с 13,5% GeO_2 *е* $n(\lambda) = -0{,}0135\lambda + 1{,}4865$.

Формулата показва с каква стъпка се променя коефициентът на пречупване n като функция на дължината на вълната λ, започвайки апроксимацията от някаква дължина на вълната, при която коефициентът на пречупване има стойност n=1,4865. Т.е тази стъпка определя наклона на апроксимиращата права Linear (1-13,5%), Тъй като стъпката е постоянна, то тя може да бъде използвана и за друга дължина на вълната (при същия процент на легиране), като отчетем съответния коефициент на пречупване за избраната дължина на вълната.

На фиг.4 правата Linear (2) се апроксимира с функцията $n(dp_{\%})=0,0017dp_{\%} + 1,4377$, където 0,0017 е стъпка с която се променя коефициентът на пречупване n като функция на процента легиращ материал при дължина на вълната 2μm. Тази стъпка определя наклона на апроксимиращата права Linear (2). Апроксимационната функция започва да работи от някаква дължина на вълната λ_x при която коефициентът на пречупване n има стойност 1,4377.

Ако усредним стъпките на различните серии, определящи съответно промяната на $n(\lambda)$ и на $n(dp_{\%})$, можем да получим обобщени апроксимационни формули, които работят със задоволителна за практиката точност – от порядъка на 0,1% грешка при различни дължини на вълните и при различни проценти на легираща добавка съответно. На фиг. 5 е показан такъв пример на зависимостта на $n(dp_{\%})$ за SiO_2 легиран с 0 до 13,5% GeO_2 (mole %) при дължина на вълната $\lambda = 0.8$ μm.



Фиг. 5. Зависимост на n(dp%) за SiO_2 легиран с 0 до 13,5% GeO_2 (mole %) при дължина на вълната λ = 0.8 μm.

III. Синтезиране на обобщена формула

Използвайки казаното до тук, можем да синтезираме една обобщена формула за пресмятане на коефициента на пречупване на SiO_2 легиран с GeO_2 в която едновременно се отчита честотната зависимост на основния материал и на легиращата добавка, както и на процентното съдържани е легиращ материал спрямо основния.

$$n(\lambda, dp_{\%GeO2}) = n(\lambda_{0\ SiO2}) + step_{\%} * d_{\%GeO2} - step_{\lambda} * (\lambda - \lambda_0) \quad (1)$$

λ - дължината на вълната за която искаме да пресметнем $n(\lambda)$ в μm;

λ_0 - избрана базисна дължина на вълната в μm. Например $\lambda_0 = 0,8$ μm;

$n(\lambda_{0\ SiO_2})$ - коефициент на пречупване за избраната базисна дължина на вълната за силициев двуокис. При дължина на вълната λ_0 =0,8 μm $n(\lambda_{0\ SiO_2}) = 1,4533317$.

$step_{\%}$ - средна стойност на стъпката с която се променя коефициентът на пречупване при промяна с 1% на концентрацията на съответния легиращ материал. За германиев двуокис приемаме $step_{\%} = 0,00155729$. В случая конкретната стойност е получена чрез апроксимацията показана на Фиг. 5. Стойността може да бъде пресметната като разликата между коефициента на пречупване при легиране с 13,5% и при чист силициев двуокис, взети при една и съща дължина на вълната, разделен на 13,5 стъпки. Анализът показва, а и на фиг. 4 ясно се вижда, че стъпката се запазва относително равномерна в

целия изследван вълнови спектър, поради което можем да я оставим без честотна компенсация. Това ще доведе до грешка, която при ниски концентрации на легиращ материал може да бъде пренебрегната.

$step_{\lambda}$ - средна стойност на стъпката с която се променя коефициентът на пречупване на основния материал при промяна с 1% на дължината на вълната. Са SiO_2 може да бъде намерена по аналогия със $step_{\%}$. За конкретния случай $step_{\lambda} = 0{,}0124$. За 100% тук сме приели 1 μm. Това е диапазонът от дължини на вълните от 0,8 до 1,8 μm в които попадат I-ви, II-ри, и III-ти оптичен прозорец. При тази постановка 1% е 0,01 μm.

$d_{\%GeO_2}$ – стойност на процента на легиращия материал (като десетично число). Напр. $d_{\%GeO_2} = 2{,}5$ (2,5%).

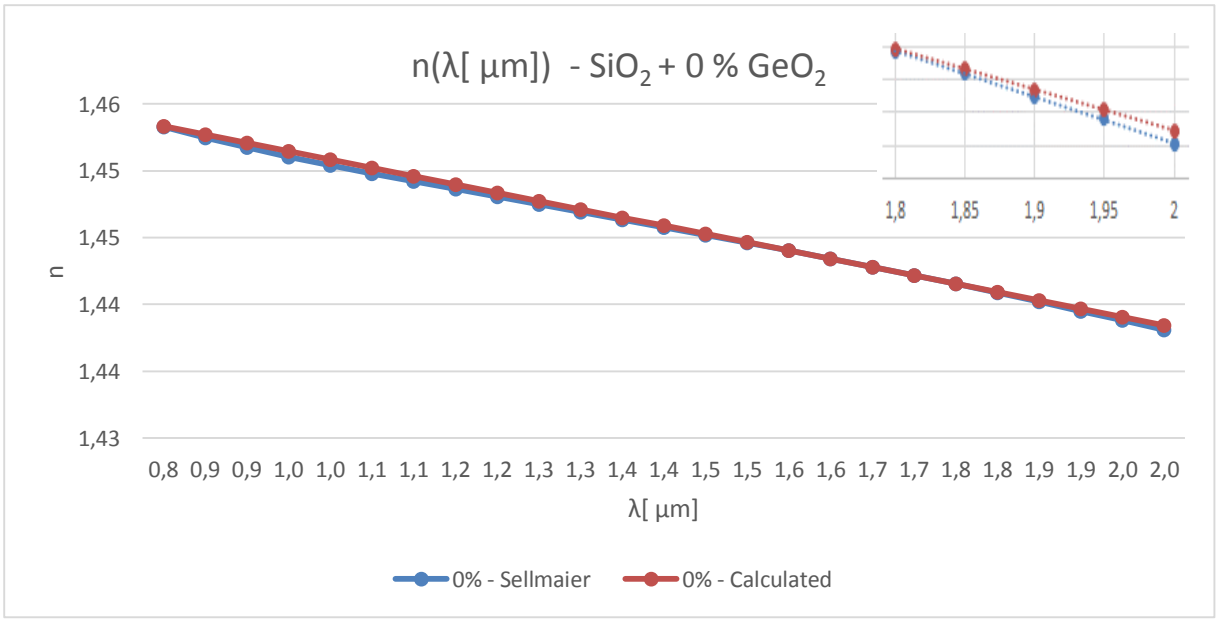
За намирането на $step_{\%}$ и $step_{\lambda}$ е използвана линейна функция. Коефициентите са коригирани незначително (с по-малко от 0,1%) спрямо посочените на фиг.2 и фиг. 3 с цел грешката от изчисленията да бъде минимизирана на средата на диапазона, около дължина на вълната 1,3 μm.

При горните допускания за формула (1) получаваме:

$$n(\lambda, dp_{\%GeO2}) = 1{,}4533317 + 0{,}155729 * d_{\%GeO2} - 0{,}0124 * (\lambda - 0{,}8). \quad (2)$$

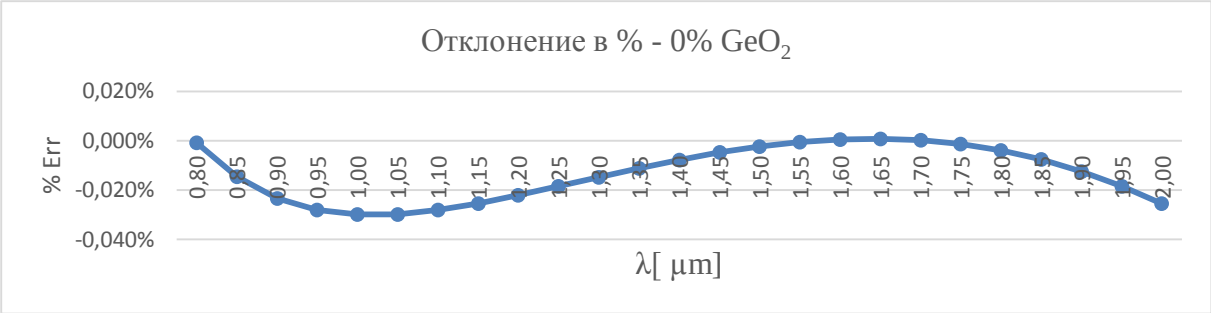
IV. Проверка на резултатите

В Таблица 5.а. от Приложение 1 са посочени изходните данни за Образец 1 от източник [1], в Табл. 5.б. от Приложение 1 са пресметнати различните коефициенти на пречупване по Sellmaier, а в Табл. 5.б. от Приложение 1 същите коефициенти на пречупване пресметнати по формула (2), На фиг. 6 е направена съпоставка на коефициентите на пречупване пресметнати по Sellmaier и по формула (2) при чист SiO_2.



Фиг. 6 - съпоставка на коефициентите на пречупване пресметнати по Sellmaier и по формула (2).

На фиг. 7 е показана разлика между изчислените по двата начина стойности изразена в % като функция на длъжната на вълната за чист SiO_2.



Фиг. 7 - разлика между изчислените по двата начина стойности изразена в % като функция на дължната на вълната.

На фиг. 1.а до 7.а в Приложение 1 са показани в графичен вид резултатите от съпоставка на коефициентите на пречупване пресметнати по Sellmaier и по формула (2) при различен процент на легиране с GeO_2.

На фиг. 1.б до 7.б в Приложение 1 са показани в графичен вид резултатите от разликата между изчислените по двата начина стойности изразена в % като функция на дължната на вълната, при различен процент на легиране с GeO_2.

V. Изводи

Целта на тази публикация е да се предложи формула за пресмятане на коефициента на пречупване на двукомпонентен материал базиран на SiO_2 и легиран с GeO_2, подходящ за изграждане на ядрата и обвивките на оптични влакна предназначени за комуникациите е постигната

За изследването са осигурени подходящи данни публикувани в [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7] и [8], които в последствие са обработени и анализирани.

Открити са подходящи зависимости, на базата на които е създадена обобщена формула за пресмятане на коефициента на пречупване на двукомпонентен материал базиран на SiO_2 и легиран с GeO_2 в подходящ са оптичните влакна за комуникации оптичен диапазон.

Направени са необходимите изчисления и получените резултати са сравнени и тези, изчислени по известните до сега методи.

Анализът на грешките показва, че точността на формулата е достатъчна както за извършване на пресмятания в процеса на обучение, така и за практико-приложни цели.

Грешката от изчислението по двата метода не надвишава 0,04% за областите на I-ви II-ри и за III-ти оптичен прозорец за изследваните образци.

Изключение прави серията при легиране със 7% GeO_2 в оптичните диапазони около 1μm и над 1,7 μm, където стойностите на грешката са от порядъка на 0,05% до 0,08%. На фиг. 3 се забелязва, че точно тази серия за Образец 1 (1-7% GeO_2) дава отклонение от останалите, вероятно поради неточност при снемането на коефициентите на Sellmaier.

Получените резултати напълно се покриват с представените в [2], [3], [5] и [6].

Формула (1) може да бъде използвана за различни варианти на основния материал SiO_2 (получен при различни технологии), както и за други легиращи материали, след съответно преизчисляване на $step_\lambda$ и $step_\%$.

По подобен начин може да бъде синтезирана и обобщена формула за пресмятане на коефициента на пречупване на двукомпонентен материал базиран на SiO_2 и легирани и с други подходящи материали - GeO_2, P_2O_5, B_2O_3, F, TiO_2 и други легиращи материали.

Създадена е предпоставка за лесно пресмятане на дисперсията, груповият коефициент на пречупване $n_g(\lambda)$, групова дисперсия на спектрална лента (GVD), както и за решаване на задачи за определяне на параметри на оптичните влакна, зависещи от $n(\lambda,dp_{\%})$.

References:

[1]. T.L Huynh, L.N Binh, Technical Report MECSE-10-2004, Fibre Design for Dispersion Compensation and Raman Amplification, Monash university, 2004, https://slideblast.com/department-of-electrical-and-computer-systems-engineering_59bf47eb1723dd350170c0ed.html
[2]. RefractiveIndex.INFO website: © 2008-2018 Mikhail Polyanskiy https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=SiO2&page=Malitson,
[3]. Тошков А, Анализ на връзките между конструктивните и експлоатационните параметри на оптичните влакна, Варна, 2011г.
[4]. UQG Optics, UQH Online, http://www.uqgoptics.com/materials_optical.aspx
[5]. Optical Materials, A Series of Advances, Volume 1, edited by Solomon Musikant, Trans Con Technologies Inc. Paoli, Pennsylvania, Provost, University of Rochester Rochester, New York, ISBN: 0-8247-8131-7, page 184., https://books.google.bg/books?id=SqFKoE7Mx5wC&printsec=frontcover&hl=bg#v=onepage&q&f=false
[6]. Bruckner, V., To the use of Sellmeier formula, 2011, X, Softcover ISBN: 978-3-8348-1302-2, https://www.researchgate.net/publication/262294649_To_the_use_of_Sellmeier_formula, http://www.springer.com/978-3-8348-1302-2,
[7]. Optical Glass Information, Ohara corporation, http://oharacorp.com/catalog.htm
[8]. James W. Fleming, Dispersion in GeO2 -SiO2 glasses, 15 December 1984 / Vol. 23, No. 24 / Applied optics, page 4486 http://classes.engr.oregonstate.edu/eecs/spring2011/ece483-001/Ge-SiO2%20dispersion%20Appl%20Optics%201984.pdf
[9]. H. M. Presby and I. P. Kaminow, "Binary silica optical fibers: refractive index and profile dispersion measurements; corrigenda," Appl. Opt. 17, 3530-3531 (1978)

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

Таблица 1. Коефициенти на Sellmeier за различни легиращи материали и концентрации по източник [3].

$Ge0_2$	0%	1,9%	3%	4,1%	7,1%
A_1	0,6962	0,6975	0,6988	0,7001	0,7027
A_2	0,4079	0,4135	0,418	0,4216	0,4294
A_3	0,8975	0,8903	0,8893	0,888	0,9034
λ_1	0,047	0,042	0,044	0,046	0,054
λ_2	0,135	0,145	0,145	0,145	0,145
λ_3	9,7934	9,82197	9,82103	9,82039	11,96797

	B_2O_3	F	F	F	P_2O_5
	3%	1%	3,1%	6,1%	9,1 %
A_1	0,6935	0,7085	0,6933	0,6774	0,6958
A_2	0,4053	0,3931	0,3972	0,4010	0,4525
A_3	0,9111	0,8503	0,8601	0,8719	0,7125
λ_1	0,0717	0,0500	0,0450	0,0380	0,0616
λ_2	0,12564	0,1290	0,1370	0,1450	0,1199
λ_3	9,89615	9,3886	9,5572	9,7147	8,65664

Таблица 2. Коефициенти на Sellmeier за различни легиращи материали и концентрации по източник [6].

	SiO_2	13,5% $Ge0_2$ + 86,5% $Si0_2$	9,1 % P_2O_5 + 90,9% $Si0_2$	13,3% B_20_3 + 86,7% SiO_2	1% F + 99% $Si0_2$	100% P_2O_5	100% GeO_2
A_1	0,696750	0,711040	0,695790	0,690618	0,691116	0,91914	0,806866
A_2	0,408218	0,451885	0,452497	0,401996	0,399166	0,67072	0,718158
A_3	0,890815	0,704048	0,712513	0,898817	0,890423	0,5696	0,854168
λ_1	0,069066	0,064270	0,061568	0,061900	0,068227	0,11921	0,068973
λ_2	0,115662	0,129408	0,119921	0,123662	0,116460	0,00256	0,153966
λ_3	9,900559	9,425478	8,656641	9,098960	9,993707	6,50697	11,8419

Таблица 3. Коефициенти на Sellmeier за различни легиращи материали и концентрации по източник [1].

	Gemanium Concentration, C (mole %) Sellmeiere Constants							
Образец 1	0 (pure silica)	3,1%	3,5%	4,1%	5,8%	7%	7,9%	13,5%
A_1	0,6961663	0,7028554	0,7042038	0,6867177	0,7088876	0,6869829	0,7136824	0,7345440
A_2	0,4079426	0,4146307	0,4160032	0,4348151	0,4206803	0,4447951	0,4254807	0,4271083
A_3	0,8974794	0,8974540	0,9074049	0,8965658	0,8956551	0,7907351	0,8964226	0,8210340
λ_1^2	0,0684043	0,0727723	0,0514415	0,0726752	0,0609053	0,0780876	0,0617167	0,0869769
λ_2	0,1162414	0,1143085	0,1291600	0,1151435	0,1254514	0,1155184	0,1270814	0,1119519
λ_3	9,8961610	9,8961610	9,8961560	10,0023980	9,8961620	10,436628	9,8961610	10,4865400

	Gemanium Concentration, C (mole %) Sellmeiere Constants					
Образец 2	2	2	2	2	2	2

	0,0%	6,3%	8,7%	11,2%	15,0%	19,3%
A_1	0,6965325	0,7083925	0,7133103	0,7186243	0,7249180	0,7347008
A_2	0,4083099	0,4203993	0,4250904	0,4301997	0,4381220	0,4461191
A_3	0,8968766	0,8663412	0,8631980	0,8543265	0,8221368	0,8081698
λ_1	0,0660932	0,0853842	0,0831439	0,0634539	0,0871572	0,0764679
λ_2	0,1181101	0,1024839	0,1079664	0,1277683	0,1078145	0,1246081
λ_3	9,8961600	9,8961750	9,8961310	9,8961810	9,8961970	9,8962030

Таблица 4. Коефициенти на Sellmeier за различни легиращи материали и концентрации по източник [5].

SiO_2	GeO_2	B_2O_3	P_20_5	A1	λ_1^2	A2	λ_2^2	A3	λ_3^2
100%				0,6961663	0,0046791	0,4079426	0,0135121	0,8974794	97,934002
96,9	3,1			0,7028554	0,0052958	0,4148307	0,0130664	0,897454	97,934
96,5	3,5			0,7042038	0,0026462	0,4160032	0,0166823	0,9074049	97,9339
94,2	5,8			0,7088876	0,0037095	0,4206803	0,0157381	0,8956551	97,93402
92,1	7,9			0,7136824	0,003808952	0,4254807	0,01614969	0,8964226	97,93401
97		3		0,6935408	0,005141195	0,4052977	0,0157853	0,9111432	97,93387
96,5		3,5		0,6929642	0,003658351	0,4047468	0,01536631	0,9154064	97,93383
100%				0,6965325	0,0043683	0,4083099	0,01395	0,8968766	97,93399
93,7	6,3			0,7083952	0,0072905	0,4203993	0,0105029	0,8663412	97,93428
	8,7			0,7133103	0,0069103	0,4250904	0,0116567	0,863198	97,93434
	11,2			0,7186243	0,0058473	0,4301997	0,0163248	0,8543265	97,9344
	15			0,724918	0,0049818	0,438122	0,011624	0,8221368	97,93472
	19,3			0,7347008	0,0052024	0,4461191	0,0155272	0,8081698	97,93353
		5,2		0,6910021	0,004431	0,402243	0,0137566	0,9489644	97,93353
			10,5	0,7058489	0,0052024	0,4176021	0,0128773	0,8952753	97,98401
				A1	λ_1	A2	λ_2	A3	λ_3
100%				0,69675	0,069066	0,408218	0,115662	0,890815	9,900559
95,9	4,1			0,6867175	0,0726752	0,4348151	0,1151435	0,8965658	10,002398
93	7			0,6869829	0,0780876	0,4447951	0,1155184	0,7907351	10,436628
86,5	13,5			0,734544	0,0869769	0,4271083	0,1119519	0,821034	10,84654
86,5		13,5		0,7072462	0,0804781	0,3941262	0,1092579	0,6330193	7,8908063
86,5	13,5			0,71104	0,06427	0,451885	0,129408	0,704048	9,425478
86,7		13,3		0,690618	0,0619	0,401996	0,123662	0,898817	9,09896
86,5		13,5		0,6762683	0,076053	0,4221311	0,1132962	0,5833977	7,8486094

Таблица 5.а. - Изходни данни за образец 1 от източник [1], **Таблица 5**.б. - Коефициенти на пречупване пресметнати по Sellmaier и **Таблица 5.в.** - Пресметнати по формула (2)

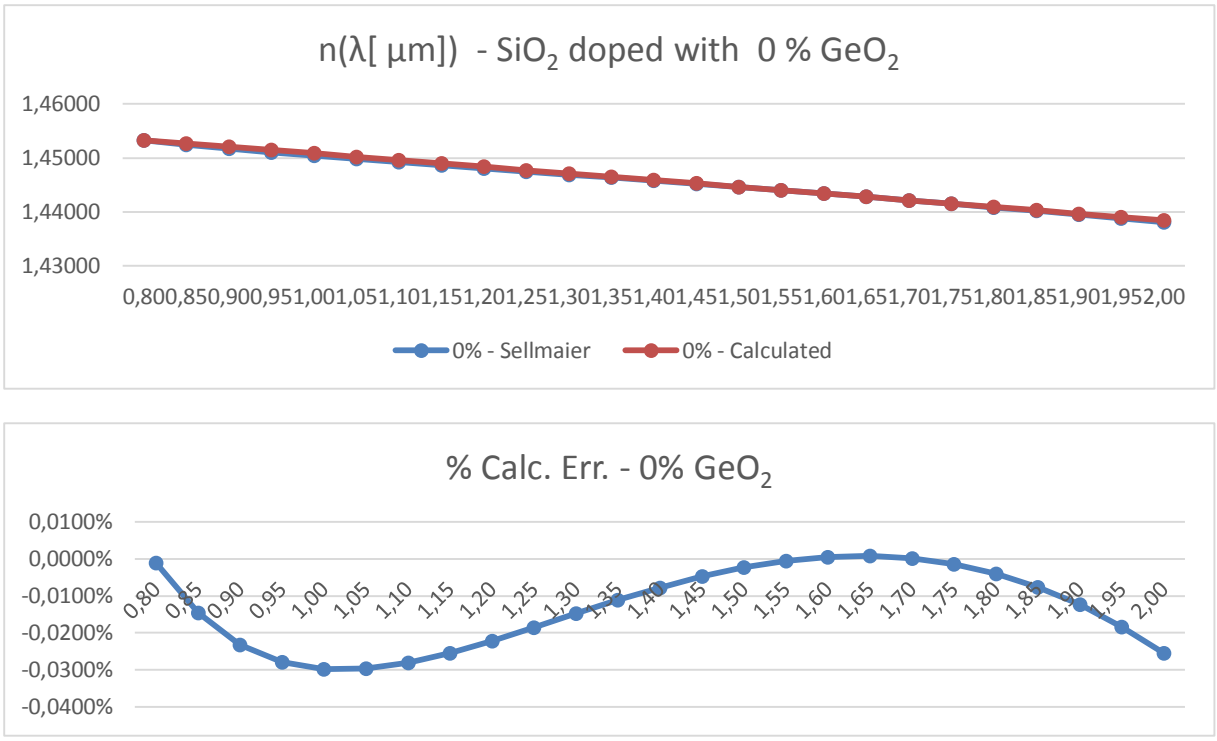
Таблица 5.а.	Gemanium Concentration, C (mole %) Sellmeiere Constants							
	0 (pure silica)	3,1	3,5	4,1	5,8	7	7,9	13,5
A_1	0,6961663	0,7028554	0,7042038	0,6867177	0,7088876	0,6869829	0,7136824	0,7345440
A_2	0,4079426	0,4146307	0,4160032	0,4348151	0,4206803	0,4447951	0,4254807	0,4271083
A_3	0,8974794	0,8974540	0,9074049	0,8965658	0,8956551	0,7907351	0,8964226	0,8210340
λ_1	0,0684043	0,0727723	0,0514415	0,0726752	0,0609053	0,0780876	0,0617167	0,0869769
λ_2	0,1162414	0,1143085	0,1291600	0,1151435	0,1254514	0,1155184	0,1270814	0,1119519
λ_3	9,8961610	9,8961610	9,8961560	10,0023980	9,8961620	10,4366280	9,8961610	10,4865400

Таблица 5.б. Sellmaier n(λ) - SiO_2 doped with GeO_2 (mole %) calculated using Sellmaier formila

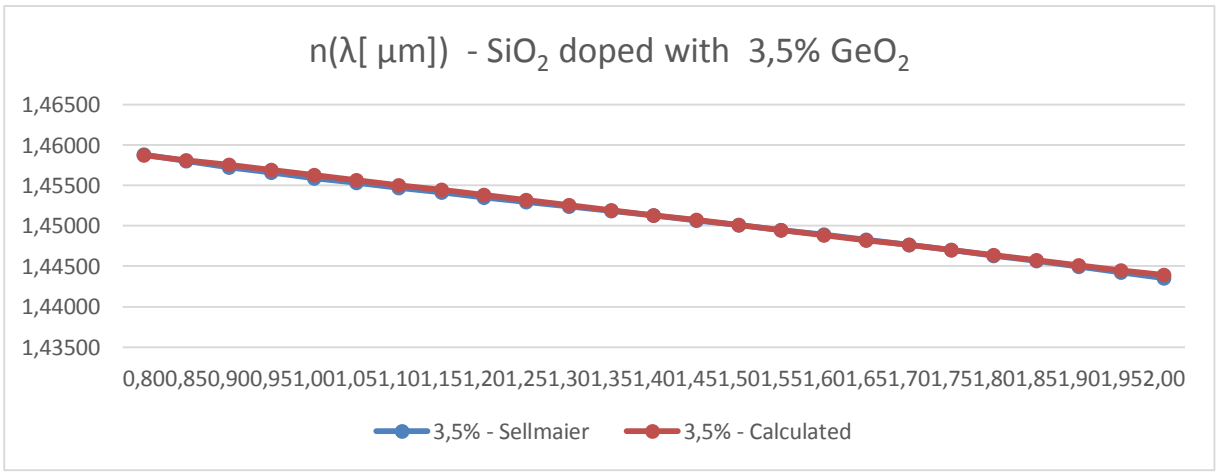
λ[μm]	0% - Sellmaier	3,1% - Sellmaier	3,5% - Sellmaier	4,1% - Sellmaier	5,8% - Sellmaier	7% - Sellmaier	7,9% - Sellmaier	13,5% - Sellmaier
0,80	**1,453317**	1,45811	1,45887	1,45968	1,46233	1,46396	1,46579	1,47450
0,85	1,45250	1,45727	1,45804	1,45883	1,46148	1,46312	1,46493	1,47361
0,90	1,45175	1,45651	1,45729	1,45807	1,46072	1,46237	1,46414	1,47282
0,95	1,45107	1,45581	1,45660	1,45736	1,46001	1,46168	1,46342	1,47210
1,00	1,45042	1,45515	1,45594	1,45670	1,45935	1,46105	1,46275	1,47144
1,05	1,44980	1,45452	1,45532	1,45607	1,45872	1,46047	1,46211	1,47082
1,10	1,44920	1,45392	1,45472	1,45547	1,45811	1,45991	1,46149	1,47024
1,15	1,44862	1,45333	1,45414	1,45488	1,45752	1,45937	1,46089	1,46968
1,20	1,44805	1,45275	1,45356	1,45431	1,45694	1,45886	1,46031	1,46915
1,25	1,44748	1,45218	1,45299	1,45374	1,45637	1,45835	1,45973	1,46862
1,30	1,44692	1,45161	1,45242	1,45318	1,45580	1,45786	1,45916	1,46810
1,35	1,44635	1,45104	1,45185	1,45261	1,45523	1,45736	1,45858	1,46760
1,40	1,44578	1,45046	1,45127	1,45204	1,45466	1,45687	1,45801	1,46709
1,45	1,44520	1,44988	1,45069	1,45147	1,45408	1,45638	1,45742	1,46658
1,50	1,44462	1,44930	1,45011	1,45090	1,45349	1,45589	1,45684	1,46607
1,55	1,44402	1,44870	1,44951	1,45031	1,45290	1,45540	1,45624	1,46556
1,60	1,44342	1,44810	1,44890	1,44971	1,45229	1,45489	1,45563	1,46505
1,65	1,44280	1,44748	1,44828	1,44911	1,45168	1,45439	1,45502	1,46452
1,70	1,44217	1,44685	1,44765	1,44849	1,45105	1,45387	1,45439	1,46399
1,75	1,44153	1,44621	1,44700	1,44786	1,45041	1,45335	1,45374	1,46346
1,80	1,44087	1,44555	1,44634	1,44722	1,44975	1,45281	1,45309	1,46291
1,85	1,44020	1,44488	1,44566	1,44656	1,44908	1,45227	1,45242	1,46235
1,90	1,43951	1,44419	1,44497	1,44588	1,44840	1,45172	1,45173	1,46178
1,95	1,43881	1,44348	1,44426	1,44519	1,44770	1,45115	1,45103	1,46121
2,00	1,43809	1,44276	1,44353	1,44449	1,44698	1,45058	1,45031	1,46061

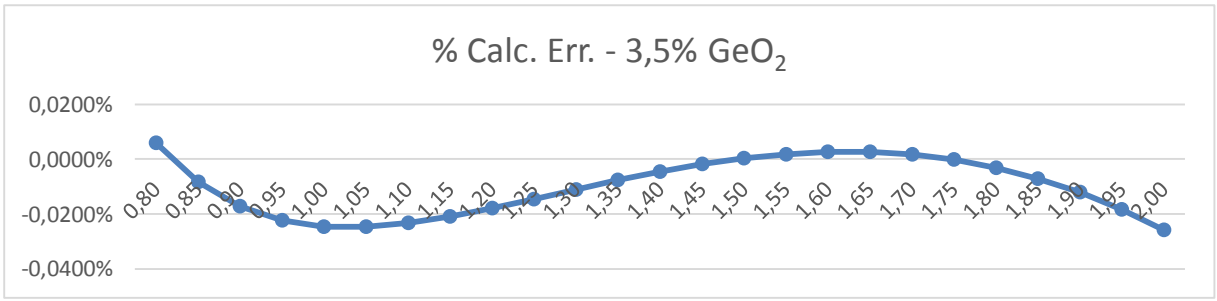
Таблица 5.в. Calculated n(λ) - SiO2 doped with GeO2 (mole %) calculated using the approximation formila

λ[μm]	0% - Calculated	3,1% - Calculated	3,5% - Calculated	4,1% - Calculated	5,8% - Calculated	7% - Calculated	7,9% - Calculated	13,5% - Calculated
0,80	1,**4533317**	1,458159	1,458782	1,459716	1,462363	1,464232	1,465631	1,474256
0,85	1,452711	1,457539	1,458162	1,459096	1,461743	1,463612	1,465014	1,473681
0,90	1,452091	1,456919	1,457542	1,458476	1,461123	1,462992	1,464394	1,473106
0,95	1,451471	1,456299	1,456922	1,457856	1,460503	1,462372	1,463774	1,472531
1,00	1,450851	1,455679	1,456302	1,457236	1,459883	1,461752	1,463154	1,471956
1,05	1,450231	1,455059	1,455682	1,456616	1,459263	1,461132	1,462534	1,471381
1,10	1,449611	1,454439	1,455062	1,455996	1,458643	1,460512	1,461914	1,470806
1,15	1,448991	1,453819	1,454442	1,455376	1,458023	1,459892	1,461294	1,470231
1,20	1,448371	1,453199	1,453822	1,454756	1,457403	1,459272	1,460674	1,469656
1,25	1,447751	1,452579	1,453202	1,454136	1,456783	1,458652	1,460054	1,469081
1,30	1,447131	1,451959	1,452582	1,453516	1,456163	1,458032	1,459434	1,468506
1,35	1,446511	1,451339	1,451962	1,452896	1,455543	1,457412	1,458814	1,467931
1,40	1,445891	1,450719	1,451342	1,452276	1,454923	1,456792	1,458194	1,467356
1,45	1,445271	1,450099	1,450722	1,451656	1,454303	1,456172	1,457574	1,466781
1,50	1,444651	1,449479	1,450102	1,451036	1,453683	1,455552	1,456954	1,466206
1,55	1,444031	1,448859	1,449482	1,450416	1,453063	1,454932	1,456334	1,465631
1,60	1,443411	1,448239	1,448862	1,449796	1,452443	1,454312	1,455714	1,465056
1,65	1,442791	1,447619	1,448242	1,449176	1,451823	1,453692	1,455094	1,464481
1,70	1,442171	1,446999	1,447622	1,448556	1,451203	1,453072	1,454474	1,463906
1,75	1,441551	1,446379	1,447002	1,447936	1,450583	1,452452	1,453854	1,463331
1,80	1,440931	1,445759	1,446382	1,447316	1,449963	1,451832	1,453234	1,462756
1,85	1,440311	1,445139	1,445762	1,446696	1,449343	1,451212	1,452614	1,462181
1,90	1,439691	1,444519	1,445142	1,446076	1,448723	1,450592	1,451994	1,461606
1,95	1,439071	1,443899	1,444522	1,445456	1,448103	1,449972	1,451374	1,461031
2,00	1,438451	1,443279	1,443902	1,444836	1,447483	1,449352	1,450754	1,460456

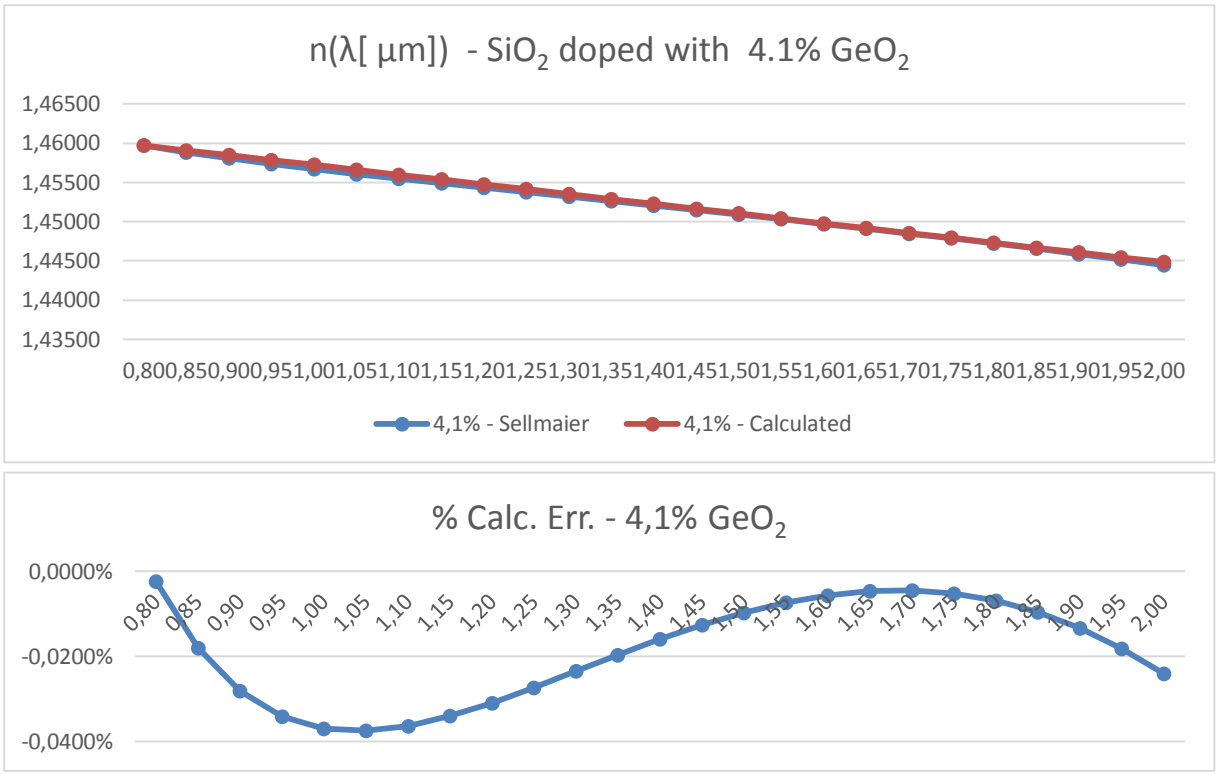


Фиг. 1.а съпоставка на коефициентите на пречупване пресметнати по Sellmaier и по формула (2). Фиг. 1.б разлика между изчислените по двата начина стойности изразена в % като функция на дължната на вълната

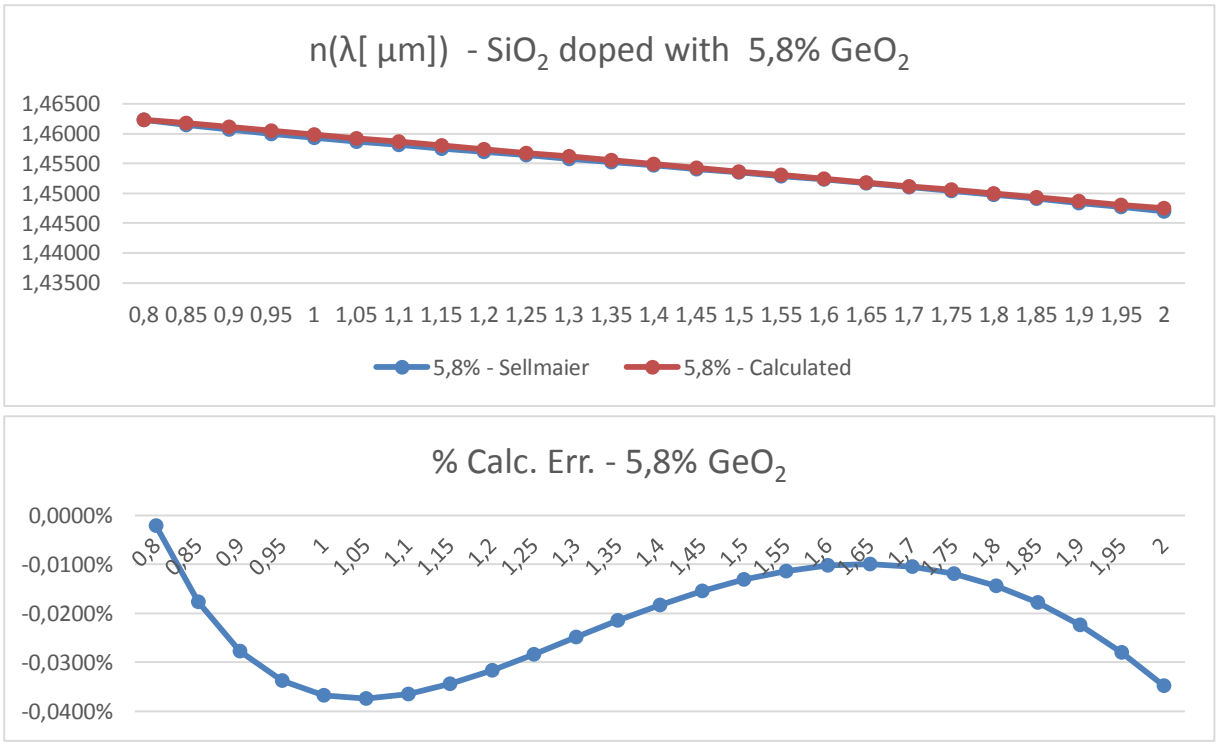




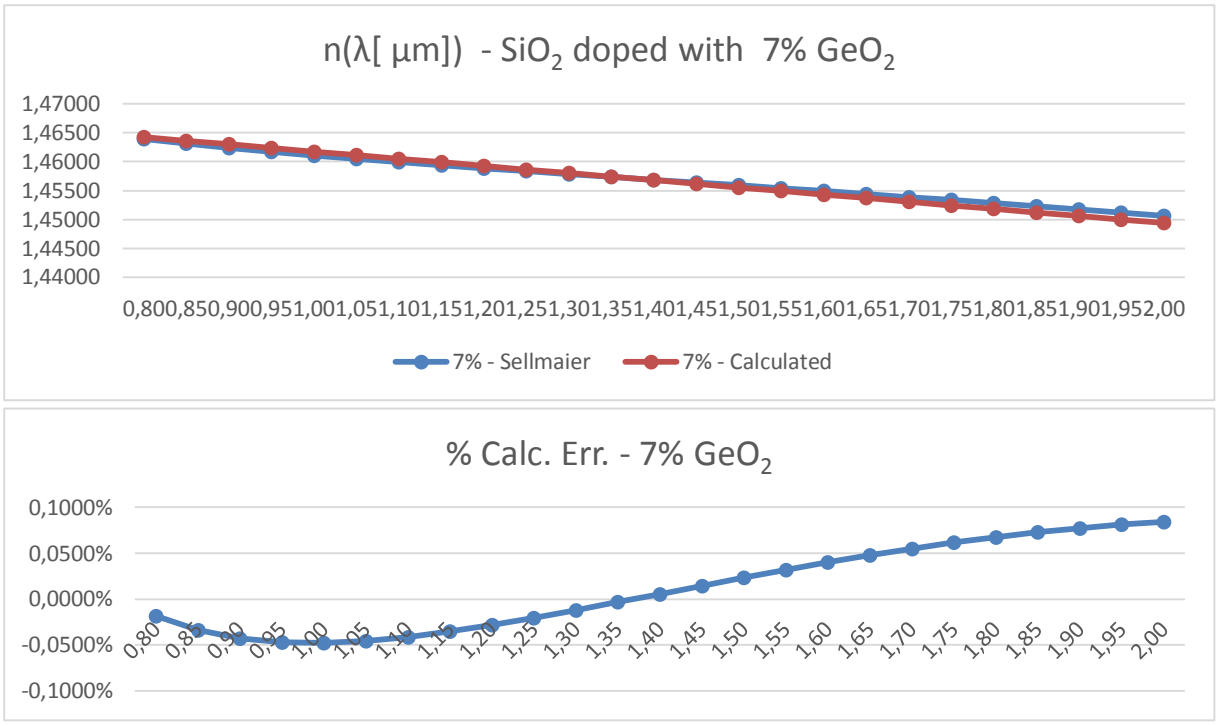
Фиг. 2.а съпоставка на коефициентите на пречупване пресметнати по Sellmaier и по формула (2). Фиг. 2.б разлика между изчислените по двата начина стойности изразена в % като функция на дължната на вълната



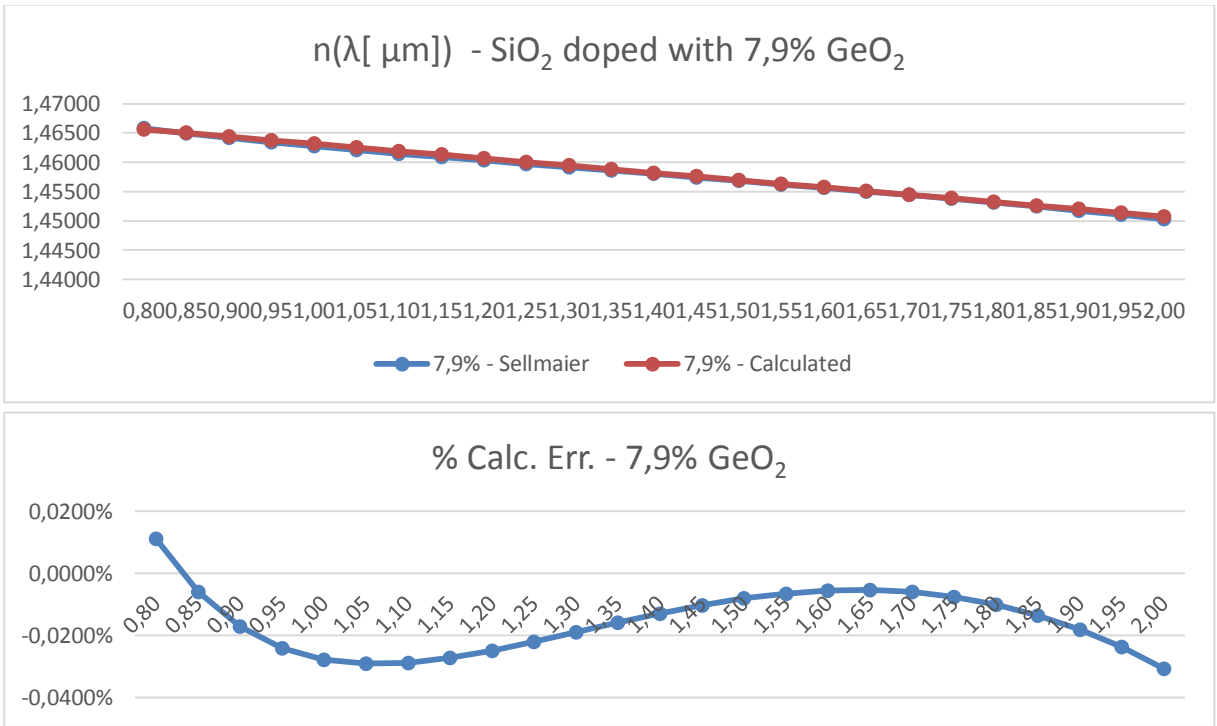
Фиг. 3.а съпоставка на коефициентите на пречупване пресметнати по Sellmaier и по формула (2). Фиг. 3.б разлика между изчислените по двата начина стойности изразена в % като функция на дължната на вълната



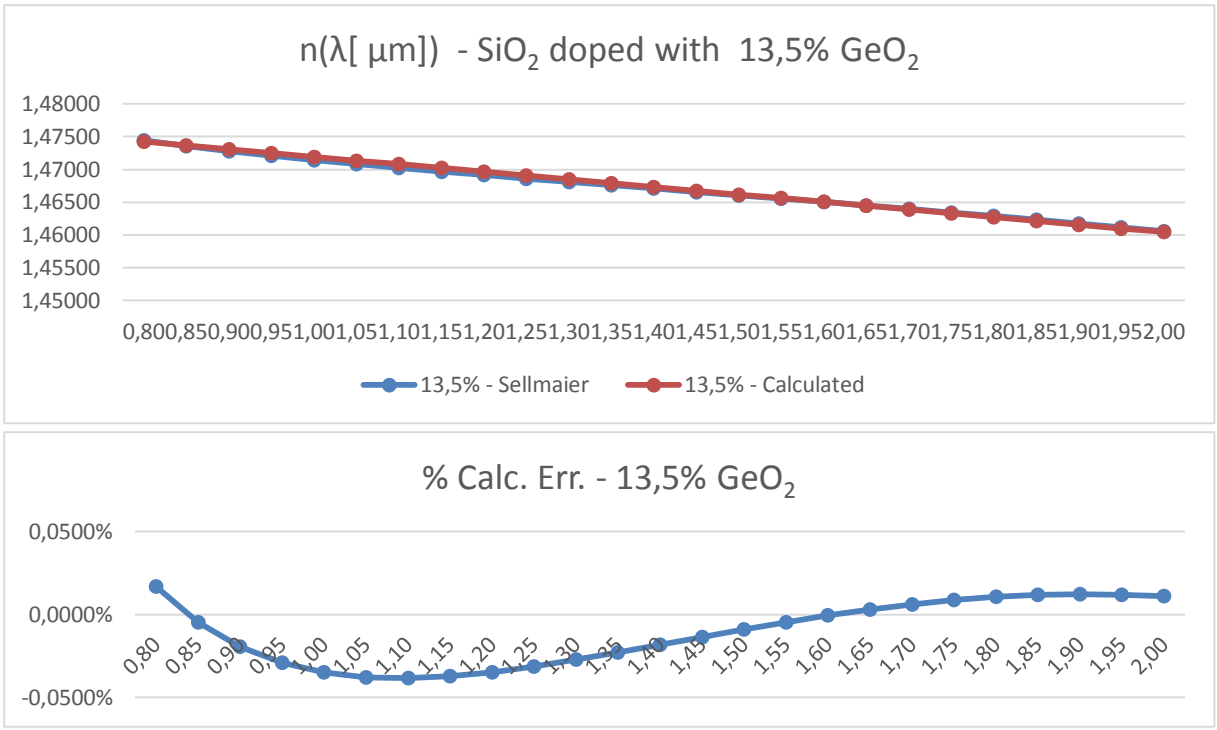
Фиг. 4.а съпоставка на коефициентите на пречупване пресметнати по Sellmaier и по формула (2). Фиг. 4.б разлика между изчислените по двата начина стойности изразена в % като функция на дължната на вълната



Фиг. 5.а съпоставка на коефициентите на пречупване пресметнати по Sellmaier и по формула (2). Фиг. 5.б разлика между изчислените по двата начина стойности изразена в % като функция на дължната на вълната



Фиг. 6.а съпоставка на коефициентите на пречупване пресметнати по Sellmaier и по формула (2). Фиг. 6.б разлика между изчислените по двата начина стойности изразена в % като функция на дължната на вълната



Фиг. 7.а съпоставка на коефициентите на пречупване пресметнати по Sellmaier и по формула (2). Фиг. 7.б разлика между изчислените по двата начина стойности изразена в % като функция на дължната на вълната