

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE
 Département de physique, de génie physique et d'optique
 Centre d'optique, photonique et laser

Supreme Certifying Committee
 of Republic of Armenia

Pavillon Optique-Photonique
 2375 rue de la Terrasse,
 Québec, Canada G1V 0A6
 Téléphone: 1 (418) 656-2025
 Télécopieur: 1 (418) 656-2623
 e-mail: galstian@phy.ulaval.ca

2021-Oct-15

Subject: RESPONSE OF OFFICIAL REFEREE to the PhD thesis of Tsarukyan Lusine Mkrtych entitled "Novel Methods for Photonic Structures Recording and Testing, Generation of Pyroelectric Optical Soliton and Micro- and Nanoparticles Photovoltaic Trapping by a Bessel Beam" for the degree of candidate of Physical-Mathematical sciences on specialization of 01.04.21 "Laser Physics".

Optics is penetrating more and more in numerous equipment and is significantly affecting the modern economy. Good examples are the intensive development of such areas of optics as optical holography, optical memories, optical switches, optical waveguides and communication systems, optical tweezers etc. The developing of novel methods and techniques for generating photonic structures and light matter interaction geometries to optimize such interactions are very actual problems today.

Thus, the topic of dissertation devoted to the novel methods for photonic structures recording and testing, generation of optical solitons and waveguides with controlled trajectories and photovoltaic trapping of micro- and nanoparticles by a Bessel beam is undoubtedly actual.

The experiments were performed in photorefractive lithium niobate crystals providing high photorefractive and pyroelectric properties which make them very suitable for numerous applications. Experimental results are supported by numerical simulation and/or physical model.

The proposed Dissertation is composed of Introduction, 4 Chapters, followed by Conclusions and bibliography (with cited 150 references).

The Introduction is well done and contains the short statements of actuality, tasks, novelty, practical value, and statements of the dissertation.

Chapter 1 describes a single Gaussian beam approach in optical holography providing simultaneous generation of 2-dimensional (2D) regular optical patterns and recording of a quasi-crystalline refractive lattice structure in the photorefractive crystal. The method is based on the extremely high photorefractive properties of Fe doped lithium niobate (LN:Fe) crystal and realized

with the use of low milliwatt power cw laser beams. Corresponding underlying physical model is elaborated. Model is based on the laser-beam-induced complex lens formation in the photorefractive crystal which produces a beam defocusing from its center and focusing on the periphery. Mutual interference of the beams forms the 2D regular optical patterns. The numerical simulations performed are in good agreement with experimental results and, more importantly, reveals and confirms the complex interference pattern occurring in the medium. The developed novel method opens a new way for the formation of reconfigurable photonic structures in photorefractive materials and elaboration of compact photonic devices.

Chapter 2 describes the generation of pyroelectric controlled bending spatial soliton in a photorefractive LN:Fe crystal by a Gaussian beam. The method is based on the elegant approach of combined action of photovoltaic and pyroelectric effects and seems to me an interesting idea for refractive index asymmetric profile formation.

The milliwatt power red beam propagation through a LN:Fe crystal and bending soliton formation is controlled by the pyroelectric effect via a 30°C increase of the crystal temperature. The digital modeling reproduces well the qualitative pictures.

The long-living waveguiding channels generated in LN:Fe crystal by optical solitons with curvilinear trajectory are promising for targeted optical information transfer.

Chapter 3 describes a novel method for the nondestructive optical testing of volume photonic structures in photorefractive crystals by application of an external magnetic field. The stability of recorded lattices against erasure during the readout by a probe Gaussian beam at the recording wavelength for 0 and 0.85 T magnetic fields has been studied. The physical model is discussed, based on the approach of small polarons and magneto-resistance effect in an external magnetic field to explain the experimental results. The novel magnetic field assisted method of nondestructive testing of photonic lattice structures is promising for the use in photonic devices and has the advantage to be simply feasible.

Chapter 4 describes a Bessel beam approach for photovoltaic trapping of micro- and nanoparticles on iron-doped lithium niobate crystal. The trapping of dielectric microparticles of CaCO₃, as well as silver nanoparticles in glycerin suspension via high contrast photovoltaic fields on the surface of LN:Fe crystal is performed and discussed. The generation of high contrast photovoltaic fields on the crystal surface is a result of a volume holographic grating recorded inside the crystal by nondiffracting Bessel beam technique. The physical model is developed to explain the experimental results.

Each chapter starts with a review of the related literature and finalizes with a summary at the end.

The main results of Dissertation are summarized in the Conclusion.

The proposed work is “validated” by the author at various events, including the seminars of the Institute for Physical Research of National Academy of Sciences of Armenia; at the FEMTO-ST institute, University of Franche-Comté (Besançon, France, 2019); presentation at numerous international conferences in Europe and USA.

The main results of the thesis were published in 5 peer-reviewed journals, as well as in SPIE proceedings, OSA Technical Digest and the International Conference’ Books of Abstracts given in the List of Publications.

Summarizing the results stated in the Chapters, I can claim that, in general, the thesis contains novel, original and interesting results with pronounced practical applications. Dissertation is well

written and results are well presented and illustrated. The work is performed on the high experimental level and results are published in the leading optical and physical Journals and presented at numerous International Conferences. Lusine Tsarukyan has also a solo paper.

I can emphasize the following achievements of the Dissertation:

1) Elaboration of a novel single Gaussian beam approach in optical holography providing simultaneous generation of regular optical patterns and recording of a quasi-crystalline refractive lattice structure in the photorefractive crystal, which is promising for elaboration of compact photonic devices.

2) Formation of the long-living waveguiding channels generated in LN:Fe crystal by optical solitons with curvilinear trajectory which are promising for targeted optical information transfer.

3) Elaboration of magnetic field assisted nondestructive optical testing of the volume photonic structures in photorefractive crystals and encoded information. The investigations allow also to reveal the variation of the photoconductivity in a magnetic field by the optical holography technique avoiding any direct contact with the crystal, which is a promising technique.

4) Design of the photovoltaic tweezers, based on the Bessel beam technique and LN:Fe crystal, which are promising for the elaboration of the *lab-on-a-chip* devices for study of trapping and manipulation of different micro- and nano-objects in real time. This technique could be used for biological micro-objects since the alternative pure optical techniques risk to create too much light absorption, heating, and destruction of living micro-objects.

However, the PhD thesis has some shortcomings which I would like to mention with comments and suggestions:

1) There are some places in dissertation where some more details might be useful, for example, the light induced formation of the space charge field or a better introduction into polaron concept. I am sure that the candidate thought that these are too simple things, but some people might not be familiar with very well.

2) I also think that some more details about the components used might be useful too, for example, the type of the CMOS camera, pixel size, etc. However, these are not really very critical and I am sure that the corresponding details are in the published articles, while, usually students have the tendency to put more details in their thesis.

3) The experimental observation of light pattern formation (sometimes called "spontaneous") was observed in many materials, ranging from gazes, liquid crystals and up to crystals (and even in LN crystals). If I understand correctly, the authors have observed the more stable or "long-living" formation of 2D light patterning in the Fe doped LN crystal. The digital modeling reproduces well the qualitative picture and reveals the complex interference pattern occurring in the medium.

4) There are several cases where the simulation results are presented without the corresponding program or script. In North America, it is of common practice to give at least some examples of the custom-made programs (e.g., in Annexes) used by the candidate, just in case, if somebody wishes to use the same approach.

5) It is a common practice to report the error bars for the processed data (e.g., Figure 23, 24, 26 and similar). I would strongly recommend the candidate to at least try to estimate it and put in the figure captions or in the main text.

Abovementioned minor shortcomings do not affect the high quality of dissertation. Certainly, the PhD thesis is an important contribution to the fields of optical holography, generation of spatial optical solitons and their controlled propagation, and engineering of trapping and manipulation of micro- and nanoparticles with the use of nondiffracting Bessel beam.

The Summary of the dissertation correctly corresponds to the content of dissertation.

PhD thesis satisfies all requirements of the Supreme Certifying Committee of RA, and its author Tsarukyan Lusine Mkrtych undoubtedly deserves the scientific degree of a Candidate of Physical-Mathematical sciences.

With my best regards,



Tigran GALSTIAN
Ph.D., P.Eng.

Professor,
Canada Research Chair « Liquid Crystals and Behavioral Biophotonics ».

UNIVERSITE LAVAL, Centre d'optique, photonique et laser (COPL)

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE
Département de physique, de génie physique et d'optique
Centre d'optique, photonique et laser

Pavillon Optique-Photonique
2375 rue de la Terrasse,
Québec, Canada G1V 0A6 Téléphone: 1 (418) 656-2025
Télécopieur: 1 (418) 656-2623
e-mail: galstian@phy.ulaval.ca

Լավալի համալսարան, Օպտիկայի, ֆոտոնիկայի և լազերի կենտրոն,
Գիտության և ճարտարագիտության Ֆակուլտետ
Ֆիզիկայի, ճարտարագիտական ֆիզիկայի և օպտիկայի ամբիոն
Քվեբեք, Կանադա

Հայաստանի Հանրապետության
Բարձրագույն որակավորման կոմիտե

15 հոկտեմբերի, 2021 թ.

Թեմա: Պաշտոնական ընդդիմախոսի կարծիքը Լուսինե Մկրտչի Ծառուկյանի «Ֆոտոնիկ կառուցվածքների գրառման և թեստավորման նոր եղանակներ, պիրոէլեկտրական օպտիկական սոլիտոնների գեներացում և միկրո- ու նանոմասնիկների ֆոտովոլտայիկ գերում բեսելյան փնջի միջոցով» թեմայով ատենախոսության վերաբերյալ Ա.04.21 – «Լազերային ֆիզիկա» մասնագիտությամբ ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման համար:

Օպտիկան ավելի ու ավելի է ներթափանցում բազմաթիվ սարքավորումների մեջ և զգալիորեն ազդում ժամանակակից տնտեսության վրա: Լավ օրինակներ են հանդիսանում օպտիկայի այնպիսի ոլորտների արագ զարգացումը, ինչպիսիք են օպտիկական հոլոգրաֆիան, օպտիկական հիշողությունը, օպտիկական փոխարկիչները, օպտիկական ալիքատարերը և հաղորդակցման համակարգերը, օպտիկական լավիտները և այլն: Ֆոտոնիկ կառուցվածքների ձևավորման և լույսի ու նյութի փոխազդեցության երկրաչափության նոր եղանակների և մեթոդների զարգացումը՝ այսպիսի փոխազդեցությունների օպտիմալացման նպատակով, այսօր հանդիսանում են շատ ակտուալ խնդիրներ:

Այսպիսով՝ ատենախոսության թեման, որը նվիրված է ֆոտոնիկ կառուցվածքների գրառման և թեստավորման, ղեկավարվող հետազոծով օպտիկական սոլիտոնների ու

ալիքատարների գեներացման և բեսեյան փնջի միջոցով միկրո- ու նանոմասնիկների ֆոտովոլտայիկ գերման նոր եղանակներին, անկասկած, ակտուալ է:

Փորձերն իրականացվել են ֆոտոռեֆրակտիվ լիթիումի նիոբատի բյուրեղներում՝ օժտված բարձր ֆոտոռեֆրակտիվ և պիրոէլեկտրական հատկություններով, որոնք նրանց դարձնում են շատ հարմար բազմաթիվ կիրառությունների համար: Փորձնական արդյունքները հաստատված են թվային հաշվարկներով և կամ ֆիզիկական մոդելով:

Առաջարկված ատենախոսությունը բաղկացած է Ներածությունից, 4 Գլուխներից, որոնց հաջորդում են եզրակացությունը և գրականության ցանկը (150 հղումներով):

Ներածությունը լավ է ներկայացված և պարունակում է արդիականության, խնդիրների, նորույթի, կիրառական նշանակության կարճ շարադրանքը և ատենախոսության դրույթները:

Գլուխ 1-ը նկարագրում է մեկ գաուսյան փնջի մոտեցումն օպտիկական հոլոգրաֆիայում, որը ապահովում է երկչափ (2D) կանոնավոր օպտիկական պատկերների և քվադրյուբեդայնի ռեֆրակտիվ ցանցային կառուցվածքի միաժամանակյա ձևավորումը ֆոտոռեֆրակտիվ բյուրեղում: Մեթոդը հիմնված է երկաթով լեզիրված լիթիումի նիոբատի (LN:Fe) բյուրեղի չափազանց բարձր ֆոտոռեֆրակտիվ հատկությունների վրա և իրականացվել է ցածր միլիվատային հզորությամբ անընդհատ լազերային ճառագայթի օգտագործմամբ: Մշակված է համապատասխան հենքային ֆիզիկական մոդելը: Մոդելը հիմնված է ֆոտոռեֆրակտիվ բյուրեղում լազերային ճառագայթով ինդուկտված բաղադրյալ ոսպնյակի ձևավորման վրա, որը տալիս է ճառագայթի դեֆոկուսացում կենտրոնից և ֆոկուսացում՝ եզրերից: Ճառագայթների փոխադարձ ինտերֆերենցիան ձևավորում է 2D կանոնավոր օպտիկական պատկերներ: Իրականացված թվային սիմուլյացիաները համընկնում են փորձնական արդյունքների հետ և, որ շատ կարևոր է, բացահայտում և հաստատում են բարդ ինտերֆերենցիոն պատկերի ձևավորվումը միջավայրում:

Մշակված նոր եղանակը նոր ուղի է բացում ֆոտոռեֆրակտիվ նյութերում վերակազմավորվող ֆոտոնիկ կառուցվածքների ձևավորման և կոմպակտ ֆոտոնիկ սարքերի մշակման համար:

Գլուխ 2-ը նկարագրում է գաուսյան փնջի միջոցով ֆոտոռեֆրակտիվ LN:Fe բյուրեղում պիրոէլեկտրականությամբ ղեկավարվող կորագիծ տարածական սոլիտոնի ձևավորումը: Եղանակը հիմնված է ֆոտոռեֆրակտիվ և պիրոէլեկտրական երևույթների համատեղ ազդեցության նուրբ մոտեցման վրա, և, ըստ իս, հանդիսանում է հետաքրքիր մտահաղացում բեկման ցուցչի անհամաչափ պրոֆիլի ձևավորման համար:

Միլիվատային հզորությամբ կարմիր ճառագայթի տարածումը LN:Fe բյուրեղի երկայնքով և կորագիծ սոլիտոնի ձևավորումը ղեկավարվել է պիրոէլեկտրական երևույթի միջոցով՝ ապահովելով բյուրեղի ջերմաստիճանի 30°C-ով աճ: Թվային մոդելավորումը լավ վերարտադրում է բարձր որակի պատկերները:

LN:Fe բյուրեղում կորագիծ հետազոծով օպտիկական սոլիտոնների միջոցով գեներացված երկար կյանքի տևողությամբ ալիքատարային ուղիները հեռանկարային են օպտիկական ինֆորմացիայի հասցեագրված փոխանցման համար:

Գլուխ 3-ը նկարագրում է նոր եղանակ ֆոտոռեֆրակտիվ բյուրեղներում ծավալային ֆոտոնիկ կառուցվածքների չբայթայող օպտիկական թեստավորման համար:

արտաքին մագնիսական դաշտի կիրառմամբ: Ուսումնասիրվել է գրառված ցանցի կայունությունը ջնջման նկատմամբ գրառման ալիքի երկարությամբ փորձնական գառուսյան փնջով թեստավորման ընթացքում, 0 և 0.85 S մագնիսական դաշտերում: Փորձնական արդյունքները բացատրելու համար քննարկվել է ֆիզիկական մոդել, որը հիմնված է փոքր պոլյարոնների մոտեցման և մագնիսական դաշտում մագնիսադիմադրության երևույթի վրա: Մագնիսական դաշտի կիրառմամբ ֆոտոնիկ ցանցային կառուցվածքների չբայթայող թեստավորման նոր եղանակը խոստումնալից է ֆոտոնիկ սարքերում օգտագործման համար և ունի հեշտությամբ իրագործվելու առավելություն:

Գլուխ 4-ը նկարագրում է բեսեյան փնջի մոտեցումը երկաթով լեզիրված լիթիումի նիոբատի բյուրեղի մակերևույթի վրա միկրո- և նանոմասնիկների ֆոտովոլտայիկ զերման համար: Իրականացվել և քննարկվել է LN:Fe բյուրեղի մակերևույթի վրա բարձր կոնտրաստով ֆոտովոլտայիկ դաշտերի միջոցով CaCO₃-ի դիէլեկտրիկ միկրոմասնիկների, ինչպես նաև գլիցերինի լուծույթում արծաթի նանոմասնիկների զերումը: Բյուրեղի մակերևույթի վրա բարձր կոնտրաստով ֆոտովոլտայիկ դաշտերի ստեղծումը հանդիսանում է չդիֆրակտվող բեսեյան փնջի տեխնիկայի միջոցով բյուրեղում գրառված ծավալային հոլոգրաֆիական ցանցի արդյունք: Մշակվել է ֆիզիկական մոդել փորձնական արդյունքները բացատրելու համար:

Յուրաքանչյուր գլուխ սկսվում է գրականությանը վերաբերող ակնարկով և վերջում ավարտվում ամփոփմամբ:

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները ամփոփված են Եզրակացության մեջ:

Ներկայացված աշխատանքը հեղինակի կողմից «վավերացվել է» տարբեր միջոցոռումներում ներառյալ սեմինարները ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկական հետազոտությունների ինստիտուտում, Franche-Comté համալսարանի FEMTO-ST ինստիտուտում (Բեզանսոն, Ֆրանսիա, 2019թ.), Եվրոպայում և ԱՄՆ-ում տարբեր միջազգային գիտաժողովների զեկույցներում:

Ատենախոսության հիմնական արդյունքները հրատարակվել են 5 գրախոսվող ամսագրերում, ինչպես նաև SPIE Proceedings-ում, OSA Technical Digest-ում և միջազգային գիտաժողովների ժողովածուներում, որոնք բերված են հրապարակումների ցանկում:

Ամփոփելով գլուխներում շարադրված արդյունքները կարող եմ պնդել, որ, ընդհանուր առմամբ, ատենախոսությունը պարունակում է նոր, յուրօրինակ և հետաքրքիր արդյունքներ ընդգծված գործնական կիրառություններով: Ատենախոսությունը լավ է գրված և արդյունքները լավ ներկայացված և պատկերված են: Աշխատանքն իրականացվել է բարձր փորձարարական մակարդակով և արդյունքները հրատարակվել են օպտիկայի ու ֆիզիկայի առաջատար ամսագրերում և ներկայացվել են տարբեր միջազգային գիտաժողովներում: Լուսինե Ծառուկյանն ունի նաև միահեղինակ հոդված:

Կարող եմ ընդգծել ատենախոսության հետևյալ ձեռքբերումները՝

1) Մեկ գառուսյան փնջի նոր մոտեցման մշակումը օպտիկական հոլոգրաֆիայում, ապահովելով միաժամանակյա կանոնավոր օպտիկական պատկերների ձևավորումը և քվազիբյուրեղային ուֆրակտիվ ցանցային կառուցվածքի գրառումը ֆոտոռեֆրակտիվ բյուրեղում, որը խոստումնալից է կոմպակտ ֆոտոնիկ սարքերի մշակման համար:

2) LN:Fe բյուրեղում երկար կյանքի տևողությամբ ալիքատարների ձևավորումը կորագիծ հետազոծով ասուլիտոնների միջոցով, որոնք խոստումնալից են օպտիկական ինֆորմացիայի հասցեգրված փոխանցման համար:

3) Մագնիսական դաշտի աջակցությամբ ֆոտոռեֆրակտիվ բյուրեղում ծավալային ֆոտոնիկ կառուցվածքների և կողավորված ինֆորմացիայի չքայքայող օպտիկական թեստավորման մշակումը: Հետազոտությունները թույլ են տալիս նաև բացահայտել մագնիսական դաշտում ֆոտոհաղորդականության փոփոխությունը օպտիկական հոլոգրաֆիայի տեխնիկայի միջոցով բացատրելով բյուրեղի հետ որևէ անմիջական հպումը, որը հեռանկարային եղանակ է:

4) Բեսելյան փնջի տեխնիկայի և LN:Fe բյուրեղի հիման վրա ֆոտովոլտայիկ լավիտների դիզայնը, որը հեռանկարային է lab-on-a-chip սարքերի մշակման և իրական ժամանակներում տարբեր միկրո- և նանոօբյեկտների գերման և տեղաշարժման հետազոտման համար: Այս տեխնիկան կարող է օգտագործվել կենսաբանական միկրոօբյեկտների համար, քանի որ այլընտանքային մաքուր օպտիկական եղանակները կարող են հանգեցնել չափազանց մեծ լույսի կլանման և կենդանի միկրոօբյեկտների տաքացման և քայքայման:

Այնուամենայնիվ, ատենախոսությունը ունի որոշ թերություններ, որոնք կցանկանայի նշել դիտողություններով և առաջարկություններով՝

1) Ատենախոսությունում կան որոշ մասեր, որտեղ ավելի շատ մանրամասնումները կարող էին օգտակար լինել, օրինակ լուսամակածված տարածական լիցքային դաշտի ձևավորումը կամ պոլյարոնի հասկացության ավելի մանրամասն ներկայացումը: Համոզված եմ, որ թեկնածուն կարծում էր, որ սրանք շատ պարզ բաներ են, բայց որոշ մարդիկ կարող են լավ ծանոթ չլինել դրանց:

2) Ես նաև կարծում եմ, որ օգտագործվող բաղադրիչների մասին ավելի շատ մանրամասները նույնպես կարող էին օգտակար լինել, օրինակ CMOS տեսախցիկի տեսակը, պիքսելի չափսը և այլն: Այնուամենայնիվ սրանք շատ կրիտիկական չեն, և համոզված եմ, որ համապատասխան մանրամասները կան հրատարակված հոդվածներում, մինչդեռ ուսանողները սովորաբար հակված են ավելի շատ մանրամասներ ներկայացնել իրենց ատենախոսության մեջ:

3) Լուսային պատկերի ձևավորման փորձնական դիտարկումը (որոշ դեպքերում կոչվում են «սպոնտան») նկատվել է շատ նյութերում՝ սկսած գազերից, հեղուկ բյուրեղներից մինչև բյուրեղներ (և նույնիսկ LN բյուրեղներում): Եթե ես ճիշտ եմ հասկացել, հեղինակները դիտարկել են Fe-ով լեզիրված LN բյուրեղում ավելի կայուն և «երկար կյանքի տևողությամբ» 2D լուսային պատկերների ձևավորում: Թվային մոդելավորումը լավ վերարտադրում է որակական պատկերը և բացահայտում միջավայրում տեղի ունեցող յուրահաստուկ ինտերֆերենցիոն պատկերը:

4) Կան մի քանի դեպքեր, երբ սիմուլյացիայի արդյունքները ներկայացված են առանց համապատասխան ծրագրի կամ նկարագրի: Հյուսիսային Ամերիկայում րնդհանուր պրակտիկա է տալ թեկնածուի կողմից օգտագործված կոմերցիոն ծրագրի որոշ օրինակներ (օրինակ՝ հավելվածներում) այն դեպքի համար, երբ որևէ մեկը կցանկանա օգտագործել նման մոտեցումը:

5) Ընդհանուր պրակտիկա է մշակված տվյալների համար սխալների տիրույթը ներկայացնելը (Օրինակ՝ Նկար 23, 24, 26 և նմանատիպ): Ես խորհուրդ կտայի

թեկնածուին անպայման փորձել գնահատել դրանք և տեղադրել նկարի նկարագրի կամ հիմնական տեքստի մեջ:

Վերը նշված փոքր թերությունները չեն ազդում ատենախոսության բարձր որակի վրա: Ատենախոսությունը, անկասկած, կարևոր ներդրում ունի օպտիկական հոլոգրաֆիայի, տարածական օպտիկական սուլիտոնների զենեքացման ու նրանց ղեկավարվող տարածման և չդիֆրակտվող բեսելյան փնջի օգտագործմամբ միկրո- ու նանոմասնիկների գերման և ղեկավարման ճարտարագիտության բնագավառներում:

Ատենախոսության սեղմագիրը ճշգրիտ համապատասխանում է ատենախոսության բովանդակությանը:

Ատենախոսությունը բավարարում է ՀՀ Բարձրագույն որակավորման կոմիտեի պահանջներին, և նրա հեղինակ Լուսինե Մկրտչի Շառուկյանը, անկասկած, արժանի է ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի:

Հարգանքներով
Տիգրան ԳԱԱ, ՄՅՅԱՆ
ՔհԾ, Ֆիզիկայի և ճրտարագիտության Պրոֆեսոր,
Կանադայի «Հեղուկ Բյուրեղներ և Վարքագծային Բիոֆոտոնիկա» Ընկերության
Նախագահ:

Հայերեն թարգմանությունը նույնական է անգլերեն բնօրինակի հետ
Հաստատում եմ,

/ՀՀ ԳԱԱ ՖՀԻ գիտական բարտուղար, ֆ.մ.գ.թ.՝

Պ. Ա. Մանթաշյան

01 Նոյեմբերի, 2021 թ.

