

**ISSN 2518-1726 (Online),
ISSN 1991-346X (Print)**

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ

Х А Б А Р Л А Р Ы

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА
СЕРИЯСЫ**

◆
СЕРИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ
◆
**PHYSICO-MATHEMATICAL
SERIES**

6 (310)

**ҚАРАША – ЖЕЛТОҚСАН 2016 Ж.
НОЯБРЬ – ДЕКАБРЬ 2016 г.
NOVEMBER – DECEMBER 2016**

**1963 ЖЫЛДЫН ҚАҢТАР АЙЫНАН ШЫҒА БАСТАҒАН
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1963 ГОДА
PUBLISHED SINCE JANUARY 1963**

**ЖЫЛЫНА 6 РЕТ ШЫҒАДЫ
ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД
PUBLISHED 6 TIMES A YEAR**

**АЛМАТЫ, ҚР ҰҒА
АЛМАТЫ, НАН РК
ALMATY, NAS RK**

Бас редакторы
ф.-м.ғ.д., проф., КР ҮФА академигі **F.M. Мұтанов**

Редакция алқасы:

Жұмаділдаев А.С. проф., академик (Қазақстан)
Кальменов Т.Ш. проф., академик (Қазақстан)
Жантаев Ж.Ш. проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)
Өмірбаев Ү.Ү. проф. корр.-мүшесі (Қазақстан)
Жусіпов М.А. проф. (Қазақстан)
Жұмабаев Д.С. проф. (Қазақстан)
Асанова А.Т. проф. (Қазақстан)
Бошкаев К.А. PhD докторы (Қазақстан)
Сұраған Ә. PhD докторы (Қазақстан)
Quevedo Hernando проф. (Мексика),
Джунушалиев В.Д. проф. (Қыргызстан)
Вишневский И.Н. проф., академик (Украина)
Ковалев А.М. проф., академик (Украина)
Михалевич А.А. проф., академик (Белорус)
Пашаев А. проф., академик (Әзірбайжан)
Такибаев Н.Ж. проф., академик (Қазақстан), бас ред. орынбасары
Тигиняну И. проф., академик (Молдова)

«КР ҮФА Хабарлары. Физика-математикалық сериясы».

ISSN 2518-1726 (Online), ISSN 1991-346X (Print)

Меншіктенуші: «Қазақстан Республикасының Үлттық ғылым академиясы» РКБ (Алматы қ.)
Қазақстан республикасының Мәдениет пен ақпарат министрлігінің Ақпарат және мұрагат комитетінде
01.06.2006 ж. берілген №5543-Ж мерзімдік басылым тіркеуіне қойылу туралы қуәлік

Мерзімділігі: жылдана 6 рет.

Тиражы: 300 дана.

Редакцияның мекенжайы: 050010, Алматы қ., Шевченко көш., 28, 219 бөл., 220, тел.: 272-13-19, 272-13-18,
www.nauka-nanrk.kz / physics-mathematics.kz

© Қазақстан Республикасының Үлттық ғылым академиясы, 2016

Типографияның мекенжайы: «Аруна» ЖК, Алматы қ., Муратбаева көш., 75.

Г л а в н ы й р е д а к т о р
д.ф.-м.н., проф. академик НАН РК **Г.М. Мутанов**

Р е д а к ц и о н на я кол л е г и я:

Джумадильдаев А.С. проф., академик (Казахстан)
Кальменов Т.Ш. проф., академик (Казахстан)
Жантаев Ж.Ш. проф., чл.-корр. (Казахстан)
Умирбаев У.У. проф. чл.-корр. (Казахстан)
Жусупов М.А. проф. (Казахстан)
Джумабаев Д.С. проф. (Казахстан)
Асанова А.Т. проф. (Казахстан)
Бошкаев К.А. доктор PhD (Казахстан)
Сураган Д. доктор PhD (Казахстан)
Quevedo Hernando проф. (Мексика),
Джунушалиев В.Д. проф. (Кыргызстан)
Вишневский И.Н. проф., академик (Украина)
Ковалев А.М. проф., академик (Украина)
Михалевич А.А. проф., академик (Беларусь)
Пашаев А. проф., академик (Азербайджан)
Такибаев Н.Ж. проф., академик (Казахстан), зам. гл. ред.
Тигиняну И. проф., академик (Молдова)

«Известия НАН РК. Серия физико-математическая».

ISSN 2518-1726 (Online), ISSN 1991-346X (Print)

Собственник: РОО «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы)

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации и архивов Министерства культуры и информации Республики Казахстан №5543-Ж, выданное 01.06.2006 г.

Периодичность: 6 раз в год.

Тираж: 300 экземпляров.

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, ком. 219, 220, тел.: 272-13-19, 272-13-18,
www.nauka-nanrk.kz / physics-mathematics.kz

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2016

Адрес типографии: ИП «Аруна», г. Алматы, ул. Муратбаева, 75.

E d i t o r i n c h i e f
doctor of physics and mathematics, professor, academician of NAS RK **G.M. Mutanov**

E d i t o r i a l b o a r d:

Dzhumadildayev A.S. prof., academician (Kazakhstan)
Kalmenov T.Sh. prof., academician (Kazakhstan)
Zhantayev Zh.Sh. prof., corr. member. (Kazakhstan)
Umirbayev U.U. prof. corr. member. (Kazakhstan)
Zhusupov M.A. prof. (Kazakhstan)
Dzhumabayev D.S. prof. (Kazakhstan)
Asanova A.T. prof. (Kazakhstan)
Boshkayev K.A. PhD (Kazakhstan)
Suragan D. PhD (Kazakhstan)
Quevedo Hernando prof. (Mexico),
Dzhunushaliyev V.D. prof. (Kyrgyzstan)
Vishnevskyi I.N. prof., academician (Ukraine)
Kovalev A.M. prof., academician (Ukraine)
Mikhalevich A.A. prof., academician (Belarus)
Pashayev A. prof., academician (Azerbaijan)
Takibayev N.Zh. prof., academician (Kazakhstan), deputy editor in chief.
Tiginyanu I. prof., academician (Moldova)

News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physical-mathematical series.

ISSN 2518-1726 (Online), ISSN 1991-346X (Print)

Owner: RPA "National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan" (Almaty)

The certificate of registration of a periodic printed publication in the Committee of information and archives of the Ministry of culture and information of the Republic of Kazakhstan N 5543-Ж, issued 01.06.2006

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 300 copies

Editorial address: 28, Shevchenko str., of. 219, 220, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,
www.nauka-nanrk.kz / physics-mathematics.kz

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2016

Address of printing house: ST "Aruna", 75, Muratbayev str, Almaty

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 6, Number 310 (2016), 25 – 31

UDC: 538.958

K.K. Dikhanbayev¹, G.K. Mussabek¹, V.A. Sivakov², D. Yermukhamed¹, A.T. Meiram¹¹ al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;² Leibniz Institute of Photonic Technology, Jena, Germany

dkadyrjan@mail.ru

MICRO-PHOTOLUMINESCENCE IN SILICON NANO-WIRES

Abstract. Silicon nano-wires are a new material with a very attractive for many different application optical properties. The main aim of the presented study is to investigate photoluminescence (PL) properties of silicon nanowires in as a function of temperature and excitation power. In this work silicon nano-wires (SiNWs) were prepared by wet chemical metal-assisted method. Monocrystalline silicon plates with p and n-type conductivity served as a substrate. Micro-photoluminescence spectra of obtained SiNWs samples measured by confocal microscopy setup. It is shown that strong PL signal centered at about 700 nm is observed only from SiNWs. Temperature-dependent PL measurements acquired for a range of temperatures 4K - 300K. It was shown that above 40K, PL signal decrease in intensity due to the increasing effect of non-radiative processes taking place causing carrier thermalization. It is also observed pronounced spectral redshift of PL spectra with increasing temperature, which is probably related with thermal de-trapping and possible migration of excitons from trapped states to lower available ones. From analysis of the PL dependence on excitation power we found that above 4 μ W of input power, quenching of PL from carrier recombination in the region >750 nm is observed (slope changes from 1.23 to 0.22). The almost linear power dependence of the emission becomes sub-linear above 4 μ W which could be an indication of saturation of Si-NC states (inherently low density of states). At the intermediate to high pump power regime, Auger recombination for example is possible in Si-NC structures as the Auger lifetime is shorter than the single exciton radiative lifetime.

Keywords: silicon nanowires, photoluminescence, temperature dependent photoluminescence, optical properties.

Introduction. Silicon nano-wires with low light reflectance and high light absorbance values attract a huge interest of researchers during last 10 years because of their great application potential for microelectronics, optoelectronics, photonics, photovoltaics, bio- and chemical sensing [1-6]. One of the wide spread ways to form SiNWs that allows to control growth and structure of nanostructures is a metal-assisted chemical etching (MACE) [7-9]. There are many papers devoted to investigations of SiNWs optical properties [10-14] but only a small part reports photoluminescence studies [15-18]. We have therefore investigated temperature dependence of photoluminescence of SiNWs. Here we report on our recent results on the characterization of SiNWs micro-photoluminescence spectra.

Experimental. SiNWs samples obtained by MACE, which performed in a few steps. First silicon surfaces dipped into 2% hydrofluoric acid (HF) aqua solution to remove the thin native silicon oxide layer and dried by argon blow, then silicon they were immersed into the first solution (thermostated by 20°C) containing 5M HF and 0.01 M AgNO₃. After a uniform layer of Ag nanoparticles was coated, the wafers were then immersed in the etchant solution composed of HF, H₂O₂, and H₂O (the volume ratios HF/H₂O₂: 1:10) at room temperature in a sealed Teflon vessel. In the last step Si wafers were immersed in a solution of concentrated nitric acid solution in order to remove the excess Ag nanoparticles and rinsed with deionized water, and then dried in vacuum at 60°C. As substrates, we have used heavy doped n-type, monocrystalline silicon plates

Micro-photoluminescence (micro-PL) measurements were conducted using a confocal microscopy setup. The sample mounted on a continuous-flow liquid-helium microscope cryostat, which enabled

cooling from 300K down to 4K. A microscope objective lens, which was mounted on a piezoelectric XYZ stage, was used to focus and collect the excitation laser light (405 nm) and the emitted PL, respectively. The laser spot size on the sample was about 2 micron in diameter. Power-dependent PL data were recorded whereby the laser power was measured before the microscope objective (actual light power on the sample is about 2.6 times less than measured). A broadband polarizing beam splitter was used to transmit the laser light into the objective lens axis and to reflect the emitted PL light into a 0.3m spectrometer where it was dispersed by a 300 line/mm grating. The entrance slit of the spectrometer was kept at 50 microns. The PL was detected by a Peltier-cooled Si charge couple device (CCD) [19].

Results and discussion.

Micro-PL spectra at room temperature. Figure 1 depicts room temperature spectra from three different samples: heavily n-doped SiNWs on Si substrate (A), weakly p-doped SiNWs on Si substrate (B) and weakly p-doped Si-NWs (C) on glass substrate transferred in solution. The spectra recorded at room temperature under similar experimental conditions within an excitation power range of 215-245 W/cm². The spectrum from the SiNWs on glass is presented for qualitative comparison as a different CCD was used for its detection. Overall, strong orange-coloured PL signal centred at about 715 nm was observed, which was visible by naked eye particularly for Sample A. Furthermore, the PL peak from all samples was broad with a FWHM of the order of 200 nm. The spectra exhibited periodic fringes, which were not due to a filter or detector etalon effect confirmed by using a front-illuminated detector. We suggested that the fringes originated from light interference effects possibly due to the difference in refractive index between air, etched region and substrate. It should be mentioned that the PL recorded from different positions on the same sample presented small variations, which confirmed a degree of structural inhomogeneity in the samples.

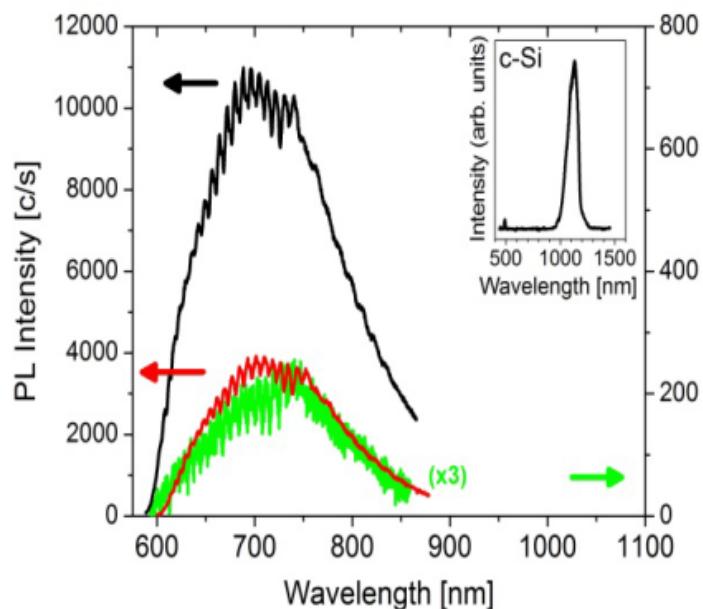


Figure 1 - PL measurements recorded at 300K from 3 different type samples: Sample A (black), Sample B (red) and Sample C (green). The input power density was 215-245W/cm². Inset: luminescence spectrum from initial bulk c-Si wafer

The spectrum from the SiNW solution on glass exhibited similar spectral features to the spectra from the other two etched Si wafers, albeit a less intense shoulder at about 700 nm. This suggests that the observed signal from Samples A and B (black and red) in the resulting etched structures. The origin of these luminescent quantum confined states is most likely multi-fold. According to the diameters of the SiNWs (>10nm), from quantum confinement theory no shift in PL peak energy compared to the bandgap of c-Si is expected. Tests have been conducted on similar structures which showed no influence of residual (if any) Ag atoms on the PL observed. The effect of native oxide on the PL (SiOx-related states, Si/SiO₂ interface states) was confirmed by HF post processing which resulted in a part of the higher

energy tail of the spectra (>1.5 eV) to be quenched. Based on previous structural studies [20] and consistent etching test series, the charge carrier confinement is attributed to arise in Si nano-crystals (Si-NCs), in particular core-shell Si-NCs/SiO₂ resulting from nanowire sidewall roughness (of the order of 1-5nm) and within the porous structure of the samples, (particularly the heavily n-doped sample).

Temperature-dependent PL emission. Temperature-dependent PL measurements were acquired from Sample A for a range of temperatures 4K - 300K. Figure 2 shows two typical PL spectra at 4K and room temperatures. For analysis purposes and easier comparison, the data was smoothed using Fast Fourier Transform filter (30 points) and normalized.

The data was de-convoluted into 3 peaks (at 640 nm, 716 nm, 822 nm) using multi-Gaussian peak fitting as shown in the inset. The 4K spectrum exhibits a broader FWHM compared to the room temperature spectrum which shows a pronounced narrowing in intensity from 750-900nm. As previously mentioned, the low energy tail of the spectra is linked to quantum confined Si-NC states whereas emission from the higher energies is attributed to a range of oxide-related states. The broadness of the 4K spectra reflects the size distribution of the Si-NCs. At such temperatures, carriers are expected to be localized in traps, defects and NCs in the form of excitons (electron-hole pairs) as their binding energy exceeds the thermal energy of the system.

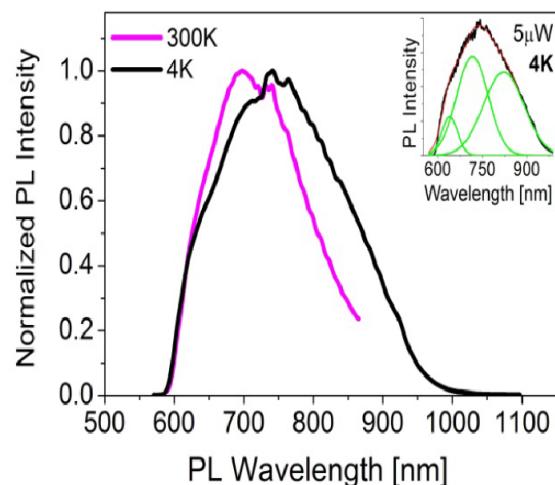


Figure 2 - Normalized PL measurements from etched Si-NWs in Sample A recorded at 300K and 4K. The input power was 4-5 μ W and laser spot size was about 2 μ m in diameter. Inset: The 4K spectrum is de-convoluted into 3 Gaussian peaks

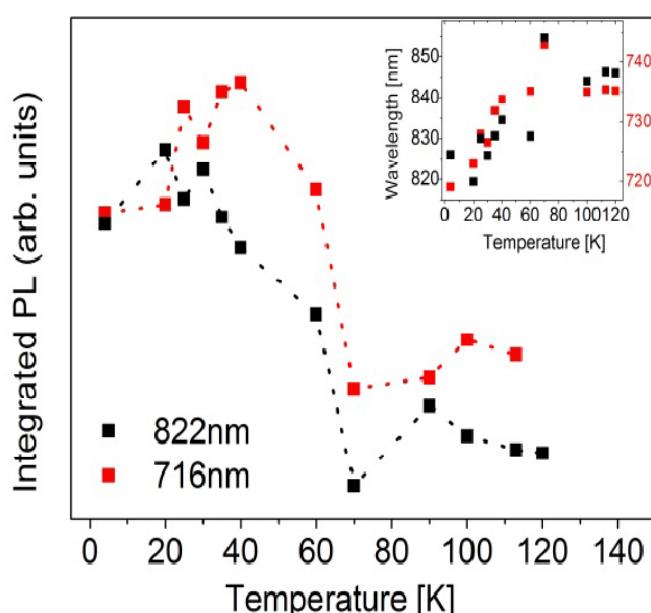


Figure 3 - Integrated PL from the de-convoluted peaks centred at 716 nm and 822 nm as a function of temperature (Sample A). Inset: Temperature-dependence of the emission wavelength of the two peaks.

Figure 3 shows the integrated PL intensity of the de-convoluted peaks 716 nm and 822 nm as a function of temperature from 4-120K. With increasing temperature a gradual quenching of the radiative contribution from the Si-NC complexes (peak 822 nm) is observed. An anti-correlated behaviour between the two peaks observed between temperatures 20-40K, whereby peak 716 nm shows an increase in intensity. Above 40K, both peaks decrease in intensity due to the increasing effect of non-radiative processes taking place causing carrier thermalization.

According to the inset of Figure 4, both peaks exhibit pronounced spectral redshift with increasing temperature. This differs from the expected temperature dependence of the bandgap of bulk Si which exhibits minimal redshift below 100K. The quenching of intensity, the spectral redshift and the reduction of FWHM for peak 822 nm suggest that thermal de-trapping and possible migration of excitons from trapped states to lower available energy states occurs. Also, the anti-correlated increase in PL intensity for peak 716 nm may suggest carrier transfer between Si-NCs and oxide/interface states.

PL emission as a function of excitation power. Figure 4 depicts normalized power dependent spectra from Sample B at room temperature. Sample A exhibited similar power-dependent PL behaviour. The main feature of the room temperature spectra is the spectral blue-shift accompanied by the relative intensity drop observed mainly for wavelengths > 750 nm. At 4.4K, a similar behaviour is observed in both samples with a more prominent drop in relative intensity in the long wavelength tail with increasing excitation power.

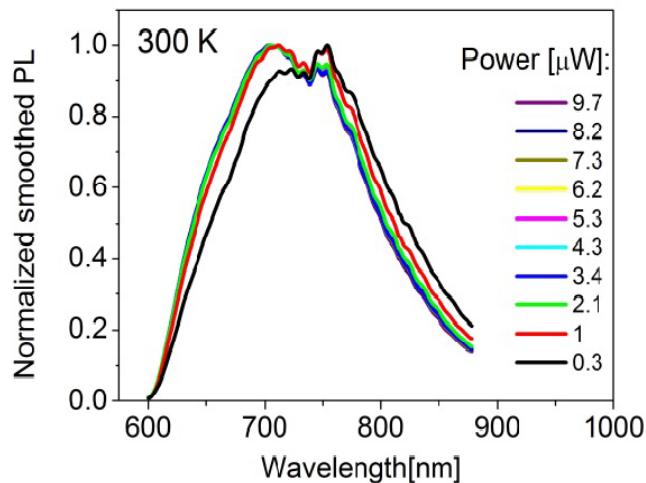


Figure 4 - Normalized power-dependent PL emission measurements from etched Si-NWs (weakly-doped p-type Si wafer) recorded at 300K. Spot diameter: 2 μm .

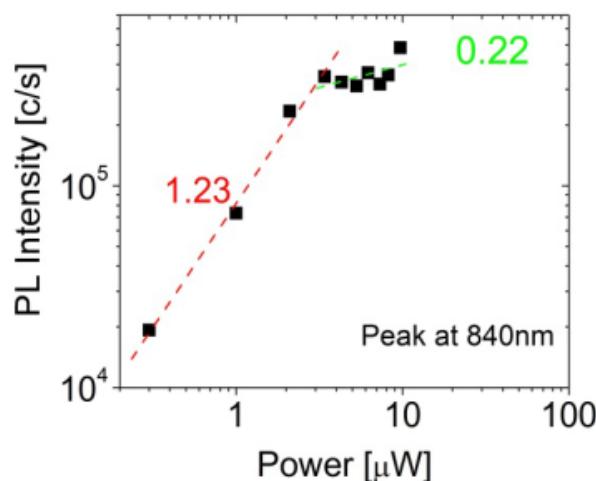


Figure 5 - The intensity of the de-convoluted peak at 840 nm (data shown in Fig. 4) is plotted as a function of excitation laser power.

Figure 5 shows the log-log plot of PL intensity of the low energy de-convoluted PL peak from the data presented in Figure 4 as a function of power. Above 4 μW of input power, quenching of PL from carrier recombination in the region >750 nm is observed (slope changes from 1.23 to 0.22). The almost linear power dependence of the emission becomes sub-linear above 4 μW which could be an indication of saturation of Si-NC states (inherently low density of states). At the intermediate to high pump power regime, Auger recombination for example is possible in Si-NC structures as the Auger lifetime is shorter than the single exciton radiative lifetime.

The samples produced by varied etching times using the two step WCE process are composed of differently shaped SiNWs that all show strong visible PL in the red-orange wavelength regime (1.5 ... 1.6 eV). The measured and normalized spectra of photon flux distribution vs. photon energy are shown in Fig. 6. Measured spectra corrected by taking into account the transfer function of the calibrated setup. It is visible that PL peak energies increase monotonically with increasing of etching time in the second step.

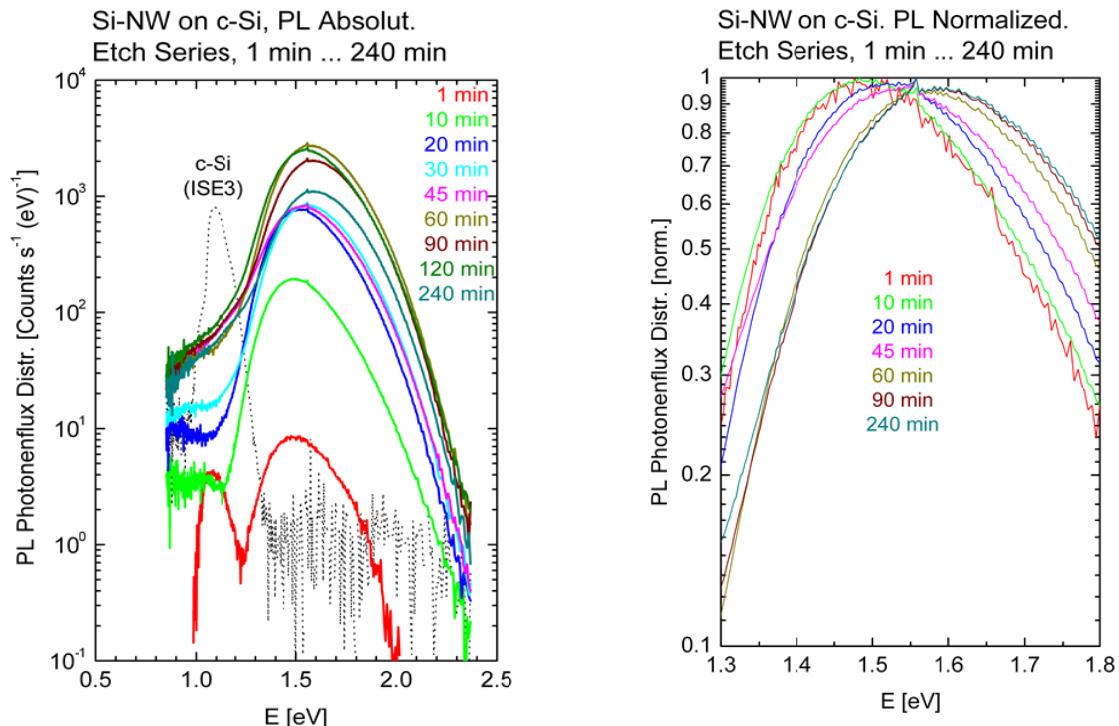


Figure 6 - Measured (left) and normalized(right) PL spectra of Si-NW samples produced by varying etching time during second etch step 2

Conclusions. We have performed detailed studies of photoluminescence properties of SiNWs grown by MACE on n- and p-type silicon wafers at room and low temperature. We have shown that strong PL signal centered at about 700 nm observed only from SiNWs. Temperature-dependent PL measurements acquired for a range of temperatures 4K - 300K. It was shown that above 40K, PL signal decrease in intensity due to the increasing effect of non-radiative processes taking place causing carrier thermalization. It is also observed pronounced spectral redshift of PL spectra with increasing temperature, which is probably related with thermal de-trapping and possible migration of excitons from trapped states to lower available ones. From analysis of the PL dependence on excitation power we found that above 4 μW of input power, quenching of PL from carrier recombination in the region >750 nm is observed (slope changes from 1.23 to 0.22). The almost linear power dependence of the emission becomes sub-linear above 4 μW which could be an indication of saturation of Si-NC states (inherently low density of states).

REFERENCES

- [1] Föll H., Hartz H., Ossei-Wusu E., Carstensen J., Riemenschneider O. (2010) Sinanowire arrays as anodes in Li ion batteries, Phys Status Solidi RRL, 4(1):4-6. DOI: 10.1002/pssr.200903344

- [2] Bronstrup G., Jahr N., Leiterer C., Csaki A., Fritzsche W., Christiansen S. (2010) Optical properties of individual silicon nanowires for photonic devices, *ACS Nano*, 4(12):7113–7122. DOI: 10.1021/nm101076t
- [3] Mussabek G.K., Timoshenko V.Yu., Dikhanbayev K.K., Dzhunusbekov A.S., Taurbayev T.I., Nikulin V.E., Taurbayev Ye.T. (2013) Antireflections coatings for silicon solar cells formed by wet chemistry methods. *KazNU Bulletin, physics series*. 2(45):14-19.
- [4] Wang X., Ozkan C.S. (2008) Multisegment nanowire sensors for the detection of DNA molecules, *NanoLetters*. 8(2):398–404. DOI: 10.1021/nl071180e
- [5] Spinelli P., Verschuuren M.A., Polman A. (2012) Broadband omnidirectional antireflection coating based on subwavelength surface Mie resonators, *Nature Communications*. 3:692(1-5).DOI: 10.1038/ncomms1691
- [6] Berthing T., Sorensen C.B., Nygård J., Martinez K.L. (2009) Applications of Nanowire Arrays in Nanomedicine, *Journal of Nanoneuroscience*. 1:3–9. DOI: 10.1166/jns.2009.001
- [7] Huang Z., Geyer N., Werner P., de Boor J., Gösele U. (2011) Metal-assisted chemical etching of silicon: a review, *Adv. Materials*. 2011. 23:285–308. DOI: 10.1002/adma.201001784
- [8] Li X., Bohn P.W. (2000) Metal-assisted chemical etching in HF₂O₂ produces porous silicon, *Applied Physics Letters*. 77(16):2572-2574. DOI: 10.1063/1.1319191
- [9] Huang Zh., Zhang X., Reiche M., Liu L., Lee W., Shimizu T., Senz S., Gosele U. (2008) Extended Arrays of Vertically Aligned Sub-10 nm Diameter [100] Si Nanowires by Metal-Assisted Chemical Etching, *Nano Letters*. 8(9):3046-3051. DOI: 10.1021/nl802324y
- [10] Gonchar K.A., Osminkina L.A., Galkin R.A., Gongalsky M.B., Marshov V.S., Timoshenko V. Yu., Kulmas M.N., Solovyev V.V., Kudryavtsev A.A., Sivakov V.A. (2012) Growth, Structure and Optical Properties of Silicon Nanowires Formed by Metal-Assisted Chemical Etching, *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*. 7:1–5. DOI: 10.1166/jno.2012.1401
- [11] Jarimaviciute-Zvalioniene R., Prosycevasa I., Kaminskienė Z., Lapinskas S. (2011) Optical Properties of Black Silicon with Precipitated Silver and Gold Nanoparticles. 40th “Jaszowiec” International School and Conference on the Physics of Semiconductors, Krynica-Zdrój. *Acta Physica Polonica A* 120(5): 942-945.
- [12] Matsui Y., Adachi S. (2013) Optical properties of “black silicon” formed by catalytic etching of Au/Si(100) wafers, *Journal of applied physics*. 113:113-123. DOI: 10.1063/1.4803152
- [13] Bett A.J., Eisenlohr J., Höhn O., Repo P., Savin H., Blasi B., Goldschmidt J.C. (2016) Wave optical simulation of the light trapping properties of black silicon surface textures, *Optics Express A*. 24(6):1-12. DOI: 10.1364/OE.24.00A434
- [14] Koynov S., Brandt M.S., Stutzmann M. (2006) Black nonreflecting silicon surfaces for solar cells, *Applied Physics Letters*. 88: 203107-1-207103-3. DOI: 10.1063/1.2204573
- [15] Baumann A.L., Guentherb K.-M., Saringc P., Gimpela T., Kontermanna S., Seibte M., Schade W. (2012) Tailoring the absorption properties of Black Silicon. *SiliconPV conference*: 02-05 April 2012, Leuven, Belgium, 480-484. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.07.097
- [16] Osminkina L.A., Gonchar K.A., Marshov V.S., Bunkov K.V., Petrov D.V., Golovan L.A., Talkenberg F., Sivakov V.A., Timoshenko V.Yu. (2012) Optical properties of silicon nanowire arrays formed by metal-assisted chemical etching: evidences for light localization effect, *Nanoscale Research Letters*. 7(524):1-6. DOI: 10.1186/1556-276X-7-524
- [17] Colli A., Hofmann S., Fasoli A., Ferrari A.C., Ducati C., Dunin-Borkowski E.R., Robertson J. (2006) Synthesis and optical properties of silicon nanowires grown by different methods, *Appl. Phys. A*. 85: 247–253. DOI: 10.1007/s00339-006-3708-8
- [18] Sakurai Y., Kakushima K., Ohmori K., Yamada K., Iwai H., Shiraishi K., Nomura Sh. (2014). Photoluminescence characterization in silicon nanowire fabricated by thermal oxidation of nano-scale Si fin structure, *Optics Express A*. 22(2):1-10. DOI: 10.1364/OE.22.001997
- [19] Mullikin C., van Vliet L.J., Netten H., Boddeke F.R., van der Feltz G.W., Young I.T. (1994) Methods for CCD camera characterization, SPIE Conference, San Jose, CA, 2173:73-84.
- [20] Dikhanbayev K.K., Sivakov V.A., Talkenberg F., Mussabek G.K., Taurbayev Ye.T., Tanatov N.N., Shabdani E. (2015) Electron backscatter diffraction in the silicon nanowires, *Physical Sciences and Technology*. 2(2):4-11.

УДК: 538.958

К.К. Диханбаев¹, Г.К. Мусабек¹, В.А. Сиваков², Д. Ермухамед¹, А.Т Мейрам¹

¹ Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан; №

² Лейбниц Институт фотонных технологий, г. Йена, Германия

МИКРО-ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КРЕМНИЕВЫХ НАНОНИТЕЙ

Аннотация. Кремниевые нанонити представляют собой новый материал с очень привлекательными оптическими свойствами для множества различных приложений. Основной целью представленной работы является исследование фотолюминесцентных свойств (ФЛ) кремниевых нанонитей в зависимости от температуры окружающей среды и и мощности возбуждающего излучения. В данной работе кремниевые нанонити (КНН) были получены методом мокрого химического металл-стимулированного травления. Монокристаллические кремниевые пластины с p- и n-типа проводимости служили в качестве подложек для выращиванияnanoструктур. Микро-спектры фотолюминесценции полученных образцов КНН, измерялись с помощью установки с конфокальным микроскопом. Показано, что интенсивный сигнал ФЛ с максимумом при длине

волны 700 нм наблюдается только от КНН. Измерения спектров ФЛ в зависимости от температуры производились в диапазоне температур 4К-300К. Было показано, что при температурах выше 40К, наблюдается уменьшение интенсивности сигнала ФЛ в связи с усилением влияния нерадиационных процессов, в результате приводящих к термализации носителей. Кроме того, с ростом температуры отмечается выраженный сдвиг спектров ФЛ в красную область спектра, что, вероятно, связано с термическим захватом и возможной миграцией экситонов из локализованных состояний к более низким. Из анализа зависимости ФЛ от мощности возбуждения мы обнаружили, что при мощности возбуждающего излучения более 4 мкВт, в области с длинами волн > 750 нм наблюдается угасание ФЛ, связанное с рекомбинацией носителей. Почти линейная зависимость мощности излучения становится суб-линейной при мощностях выше 4 мкВт, что может быть признаком насыщения состояний Si-NC (низкой плотности состояний).

Ключевые слова: кремниевые нанонити, фотолюминесценция, температурная зависимость фотолюминесценции, оптические свойства.

УДК: 538.958

К.К. Диханбаев¹, Г.К. Мусабек¹, В.А. Сиваков², Д. Ермухамед¹, А.Т Мейрам¹

¹ Әл-Фараби атындағы Казақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

² Лейбниц Фотондық технологиялар институты, Йена қ., Германия

КРЕМНИЙ НАНОТАЛШЫҚТАРЫНЫҢ МИКРО-ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯСЫ

Андатта. Кремний наноталышктыры алуан түрлі қолданулар үшін өте қажетті оптикалық қасиеттерге ие жана материал болып табылады. Берілген жұмыстың негізгі мақсаты болып қоршаған орта температурасы мен қоздырылатын сәулелену қуатына тәуелді болатын кремний наноталышктырының фотолюминесценциялық қасиеттерін (ФЛ) зерттеу табылады. Аталған жұмыста кремний наноталышктыры (КНТ) сүйық химиялық метал-енгізілген жеміру әдісімен алынды. p- және n-типті өткізгіштігі бар монокристаллдық кремний пластиналары наноқұрылымдарды есіруге арналған төсөніштер ретінде пайдаланылды. Алынған КНТ ұлғілерінің фотолюминесценциясының микро-спектрлері конфокальді микроскопы бар кондырығының көмегімен өлшеннді. Максимумы 700 нм толқын ұзындығында болатын ФЛ-дың интенсивті сигналы КНТ-нан ғана байқалатыны көрсетілді. Температурага тәуелді ФЛ спектрлерін өлшеу 4K-300K температуралар диапазонында жүргізілді. 40K-нен жоғары температураларда радиациялық емес процесстердің күшеюімен байланысты нәтижесінде тасымалдағыштардың термализациясына экелетін ФЛ сигналы интенсивтілігінің азауы байқалатындығы көрсетілді. Сонымен катар температура жоғарылаған сайын ФЛ спектрлерінің спектрлідің қызыл облысына айқындалған жылжуы аталаған етеді, бұл термиялық кармаумен және экситондардың локализацияланған күйлерден төменірек күйлерге мүмкін болатын миграциясымен байланысты. Қоздыратын сәулениң қуатына байланысты ФЛ-ны талдаудан біз > 750 нм толқын ұзындықтары облысында қоздыратын сәулелену қуаты 4 мкВт-тан жоғары болған кезде тасымалдағыштардың рекомбинациясымен байланысты ФЛ-ның өшүі байқалатындығын таптық. 4 мкВт-тан жоғары қуаттарда сәулелену қуатының сыйықтық тәуелділігі суб-сыйықтық болады, бұл Si-NC (күйдің төмен тығыздығы) күйлерінің қанығуының белгісі болуы мүмкін.

Тірек сөздер: кремний наноталышктыры, фотолюминесценция, фотолюминесценцияның температуралық тәуелділігі, оптикалық қасиеттер.

МАЗМУНЫ

| | |
|---|-----|
| <i>Бакранова Д.И., Күкүшкін С.А., Бейсембетов И.К., Осипов А.В., Нұсупов К.Х., Бейсенханов Н.Б., Қенжалиев Б.К., Сейтөв Б.Ж.</i> Ақауы аз кремний матрицаларындағы атомдардың орнын басу әдісімен алынған эпитетаксиалды SiC қабыршақтарын рентгендік талдау..... | 5 |
| <i>Батышев Д.Ф., Рамазанов Т.С., Досбалаев М.К., Габдуллин М.Т., Ерланұлы Е.</i> Жоғары жиілікті сыйымдылық разрядында газдық фазадан плазмохимиялық әдісімен көміртек нанотүтікшелерін синтездеу..... | 10 |
| <i>Демьянова А.С., Данилов А.Н., Буртебаев Н., Джансейтов Д.М., Керимкулов Ж., Алимов Д.К., Мухамеджанов Е.С.</i> | |
| ¹³ C ядронының экзотикалық құйларінің радиустары..... | 17 |
| <i>Сарсенгельдин М.М., Слямхан М.М., Бижигитова Н.Т.</i> Қозғалмалы шекарасы бар оське тимейтін жылуеңтігіштік тендеуінің жылу көмүшелері арқылы аналитикалық шешімі..... | 21 |
| <i>Бакранова Д.И., Күкүшкін С.А., Бейсембетов И.К., Осипов А.В., Нұсупов К.Х., Бейсенханов Н.Б., Қенжалиев Б.К., Сейтөв Б.Ж.</i> Ақауы аз кремний матрицаларындағы атомдардың орнын басу әдісімен алынған эпитетаксиалды SiC қабыршақтарын рентгендік талдау..... | 25 |
| <i>Диханбаев К.К., Мусабек Г.К., Сиваков В.А., Ермұхамед Да., Мейрам А.Т.</i> Кремний наноталшықтарының микропhotолюминесценциясы..... | 32 |
| <i>Батышев Д.Ф., Рамазанов Т.С., Досбалаев М.К., Габдуллин М.Т., Ерланұлы Е.</i> Жоғары жиілікті сыйымдылық разрядында газдық фазадан плазмохимиялық әдісімен көміртек нанотүтікшелерін синтездеу..... | 38 |
| <i>Демьянова А.С., Данилов А.Н., Буртебаев Н., Джансейтов Д.М., Керимкулов Ж., Алимов Д.К., Мухамеджанов Е.С.</i> | |
| ¹³ C ядронының экзотикалық құйларінің радиустары..... | 45 |
| <i>Сергеев Д.М., Шүккев Қ.Ш.</i> «Ниобий – көміртекті нанотүтікше (5,5) – ниобий» нанотүйіспесінің транспорттық сипаттамаларының компьютерлік модельдеуі..... | 49 |
| <i>Досбалаев М.К., Утегенов А.У., Тажен А.Б., Рамазанов Т.С., Габдуллин М.Т.</i> Импульстік плазмалық ағынның динамикалық қасиеттері мен импульстік плазмалық деткіштегі тозаңың пайда болуы..... | 59 |
| <i>Мингілаев М.Ж., Жұмабек Т.М.</i> Тенбүйірлі шектелген үш дене мәселесі | 67 |
| <i>Оразбаев С.А., Өмірбеков Д.Б., Досбалаев М.К., Габдуллин М.Т., Рамазанов Т.С.</i> Сынақта тозанды-плазмалы шамның жарық беру қасиетін зерттеу..... | 74 |
| <i>Жақып К.Б.</i> Сұйықтықтар мен газдардағы химиялық реакциялары бар термобародиффузияларды моделдеу..... | 80 |
| <i>Оразбаев С.А., Өмірбеков Д.Б., Габдуллин М.Т., Досбалаев М.К., Рамазанов Т.С.</i> Газ температурасының тозанды нанобөлшектердің өлшемі мен құрылымына әсері..... | 89 |
| <i>Жақып-тегі К. Б.</i> Гүктың заңымен серпілімдік теориясында моделдеу. Кернеулер тензорында симметрия жоктығы..... | 96 |
| <i>Буртебаев Н., Алимов Да., Зазулин Да.М., Керимкулов Ж.К., Юшков А.В., Джансейтов Да.М., Мухамеджанов Е., Насрулла М.</i> Төмөнгі энергиялы протондардың ¹⁴ N ядронымен әсерлесу потенциал параметрлерін анықтау..... | 104 |
| <i>Буртебаев Н., Керимкулов Ж.К., Амангелді Н., Алимов Да.К., Мухамеджанов Е.С., Джансейтов Да.М., Мауей Б., Аймаганбетов А., Курхмедов А.Е., Бекбаев С.М., Мадиярова А.Ж.</i> 17,5 және 41 МэВ энергияларда ¹¹ B ядроларынан ¹⁴ N иондарының серпімді шашырауын зерттеу..... | 109 |
| <i>Искакова У.А., Төребек Б.Т.</i> Лаплас операторы үшін робен-коши қисынсыз есебін шешудің бір әдісі туралы..... | 115 |
| <i>Шинibaев М.Д., Беков А.А., Даирбеков С.С., Жолдасов С.А., Мырзакасова Г.Е., Алиаскаров Да.Р., Шекербекова С.А., Садыбек А.Ж.</i> Екі жылжымайтын нұктес проблемасының жаңа нұсқасы..... | 121 |
| <i>Сарсенбаев Х.А., Хамзина Б.С., Колдасова Г.А., Исаева Г.Б.</i> Модификацияланған алс лигносульфонатты реагенттін (НПП «Азимут») зерттеу..... | 126 |

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----|
| <i>Бакранова Д.И., Кукушкин С.А., Бейсембетов И.К., Осипов, А.В. Нусупов К.Х., Бейсенханов Н.Б., Кенжалиев Б.К., Сейтов Б.Ж.</i> Рентгеновский анализ эпитаксиальных пленок SiC, выращенных методом замещения атомов на подложках низкодефектного кремния..... | 5 |
| <i>Батрышев Д.Г., Рамазанов Т.С., Досбалаев М.К., Габдуллин М.Т., Ерланулы Е.</i> Синтез углеродных нанотрубок плазмохимическим методом осаждения из газовой фазы в высокочастотном емкостном разряде..... | 10 |
| <i>Демьянова А.С., Данилов А.Н., Буртебаев Н., Джансейтов Д.М., Керимкулов Ж., Алиев Д.К., Мухамеджанов Е.С.</i> Экзотические состояния ядра ^{13}C с аномальными радиусами..... | 17 |
| <i>Сарсенгельдин М.М., Слямхан М.М., Бижигитова Н.Т.</i> Аналитическое решение уравнения теплопроводности с движущимися границами не касающиеся оси тепловыми полиномами..... | 21 |
| <i>Бакранова Д.И., Кукушкин С.А., Бейсембетов И.К., Осипов А.В., Нусупов К.Х., Бейсенханов Н.Б., Кенжалиев Б.К., Сейтов Б.Ж.</i> Рентгеновский анализ эпитаксиальных пленок SiC, выращенных методом замещения атомов на подложках низкодефектного кремния..... | 25 |
| <i>Диханбаев К.К., Мусабек Г.К., Сиваков В.А., Ермухамед Д., Мейрам А.Т.</i> Фотолюминесценция кремниевых нанонитей..... | 32 |
| <i>Батрышев Д.Г., Рамазанов Т.С., Досбалаев М.К., Габдуллин М.Т., Ерланулы Е.</i> Синтез углеродных нанотрубок плазмохимическим методом осаждения из газовой фазы в высокочастотном емкостном разряде..... | 38 |
| <i>Демьянова А.С., Данилов А.Н., Буртебаев Н., Джансейтов Д.М., Керимкулов Ж., Алиев Д.К., Мухамеджанов Е.С.</i> Экзотические состояния ядра ^{13}C с аномальными радиусами..... | 45 |
| <i>Сергеев Д.М., Шункеев К.Ш.</i> Компьютерное моделирование транспортных характеристик наноконтакта «Ниобий – углеродная нанотрубка (5,5) – ниобий»..... | 49 |
| <i>Досбалаев М.К., Утегенов А.У., Тажен А.Б., Рамазанов Т.С., Габдуллин М.Т.</i> Динамические свойства импульсного плазменного потока и пылеобразование в ИПУ..... | 59 |
| <i>Минглибаев М.Дж., Жумабек Т.М.</i> К равнобедренной ограниченной задаче трех тел..... | 67 |
| <i>Оразбаев С.А., Омирбеков Д.Б., Досбалаев М.К., Габдуллин М.Т., Рамазанов Т.С.</i> Экспериментальное исследование свойства светоотдачи плазменно-пылевой лампы..... | 74 |
| <i>Джакупов К.Б.</i> Моделирование термобародиффузий с химическими реакциями в жидкостях и газах..... | 80 |
| <i>Оразбаев С.А., Омирбеков Д.Б., Габдуллин М.Т., Досбалаев М.К., Рамазанов Т.С.</i> Влияние температуры газа на размеры и структуры пылевых наночастиц..... | 89 |
| <i>Джакупов К.Б.</i> Моделирование по закону Гука в теории упругости. Несимметричность тензора напряжений | 96 |
| <i>Буртебаев Н., Алиев Д., Зазулин Д.М., Керимкулов Ж.К., Юшков А.В., Джансейтов Д.М., Мухамеджанов Е., Насрулла М.</i> Определение параметров потенциала взаимодействия протона с ^{14}N при низких энергиях..... | 104 |
| <i>Буртебаев Н., Керимкулов Ж.К., Амангелди Н., Алиев Д.К., Мухамеджанов Е.С., Джансейтов Д.М., Маев Б., Аймаганбетов А., Курахмедов А.Е., Бекбаев С.М., Мадиярова А.Ж.</i> Исследование упругого рассеяния ионов ^{14}N на ядрах ^{11}B при энергиях 17,5 и 41 МэВ..... | 109 |
| <i>Искакова У.А., Торебек Б.Т.</i> Об одном методе решения некорректной задачи робена-коши для оператора лапласа... | 115 |
| <i>Шинibaев М.Д., Беков А.А., Даирбеков С.С., Жолдасов С.А., Мырзакасова Г.Е., Алиаскаров Д.Р., Шекербекова С.А., Садыбек А.Ж.</i> О новой версии задачи двух неподвижных центров..... | 121 |
| <i>Сарсенбаев Х.А., Хамзина Б.С., Колдасова Г.А., Исаева Г.Б.</i> Исследование модифицированного реагента АЛС лигносульфонатная (НПП «Азимут») | 126 |

CONTENTS

| | |
|---|-----|
| <i>Bakranova D.I., Kukushkin S.A., Beisembetov I.K., Osipov A.V., Nussupov K.Kh., Beisenkhanov N.B., Kenzhaliev B.K., Seitov B.Zh.</i> X-Ray analysis of SiC epitaxial films grown by method of atom replacement on low dislocation silicon substrate..... | 5 |
| <i>Batryshev D.G., Ramazanov T.S., Dosbolayev M.K., Gabdullin M.T., Yerlanuly Ye.</i> Synthesis of carbon nanotubes by plasma chemical deposition method from vapour-phase in radio-frequency capacitive discharge..... | 10 |
| <i>Demyanova A.S., Danilov A.N., Burtebayev N., Janseitov D.M., Kerimkulov Zh., Alimov D.K., Mukhamejanov Y.S.</i> Exotic states of ^{13}C nuclei with abnormal radii..... | 17 |
| <i>Sarsengeldin M.M., Slyamkhan M.M., Bizhigitova N.T.</i> Analytical solution of heat equation with moving boundary not tangent to axis by heat polynomials..... | 21 |
| <i>Bakranova D.I., Kukushkin S.A., Beisembetov I.K., Osipov A.V., Nussupov K.Kh., Beisenkhanov N.B., Kenzhaliev B.K., Seitov B.Zh.</i> X-ray analysis of SiC epitaxial films grown by method of atom replacement on low dislocation silicon Substrate..... | 25 |
| <i>Dikhanbayev K.K., Mussabek G.K., Sivakov V.A., Yermukhamed D., Meiram A.T.</i> Micro-photoluminescence in silicon nano-wires..... | 32 |
| <i>Batryshev D.G., Ramazanov T.S., Dosbolayev M.K., Gabdullin M.T., Yerlanuly Ye.</i> Synthesis of carbon nanotubes by plasma chemical deposition method from vapour-phase in radio-frequency capacitive discharge..... | 38 |
| <i>Demyanova A.S., Danilov A.N., Burtebayev N., Janseitov D.M., Kerimkulov Zh., Alimov D.K., Mukhamejanov Y.S.</i> Exotic states of ^{13}C nuclei with abnormal radii | 45 |
| <i>Sergeyev D.M., Shunkeyev K.Sh.</i> Computer simulation of transport properties of nanocontact "Niobium – carbon nanotubes (5.5) – niobium"..... | 49 |
| <i>Dosbolayev M.K., Utegenov A.U., Tazhen A.B., Ramazanov T.S., Gabdullin M.T.</i> Dynamic properties of pulse plasma flow and dust formation in the pulsed plasma accelerator..... | 59 |
| <i>Minglibayev M.Zh., Zhumabek T.M.</i> On the isosceles restricted three-body problem..... | 67 |
| <i>Orazbayev S.A., Omirbekov D.B., Dosbolayev M.K., Gabdullin M.T., Ramazanov T.S.</i> Experimental research of luminous efficiency of dusty plasma lamp..... | 74 |
| <i>Zhakupov K.B.</i> Modeling thermal barodiffusion with chemical reactions in liquids and gases..... | 80 |
| <i>Orazbayev S.A., Omirbekov D.B., Gabdullin M.T., Dosbolayev M.K., Ramazanov T.S.</i> The influence of gas temperature on size and structure of the dust nanoparticles..... | 89 |
| <i>Jakupov K.B.</i> Modeling Hooke's law in the theory of elasticity. Unsymmetrical stress tensor..... | 96 |
| <i>Burtebayev N., Alimov D.K., Zazulin D.M., Kerimkulov Zh.K., Yushkov A.V., Janseitov D.M., Mukhamejanov Y., Nassurlla M.</i> Determination of parameters of proton ^{14}N interaction potential at low energies..... | 104 |
| <i>Burtebayev N., Kerimkulov Zh.K., Amangeldi N., Alimov D.K., Mukhamejanov Y.S., Janseitov D.M., Mauey B., Aymaganbetov A., Kurakhmedov A., Bekbaev S.M., Madiyarova A.Zh.</i> Study of elastic scattering of ^{14}N ions from ^{16}O at energies 17,5 and 41 MeV..... | 109 |
| <i>Iskakova U.A., Torebek B.T.</i> Certain method of solving ill-posed cauchy-robin problem for the laplace operator | 115 |
| <i>Shinibaev M.D., Bekov A.A., Dairbekov S.S., Zholdasov S.A., Myrzakasova G.E., Aliaskarov D.R., Shekerbekova S.A., Sadybek A.G.</i> A new version of the problem of two fixed centers..... | 121 |
| <i>Sarsenbayev Kh.A., Khamzina B.S., Koldassova G.A., Issayeva G.B.</i> Research of modified reagent ALS lignosulfonate (NPP «Azimut»)..... | 126 |

Publication Ethics and Publication Malpractice in the journals of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the described work has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct (http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf). To verify originality, your article may be checked by the Cross Check originality detection service <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайтах:

www.nauka-nanrk.kz

<http://www.physics-mathematics.kz>

ISSN 2518-1726 (Online), ISSN 1991-346X (Print)

Редактор М. С. Ахметова, Д.С. Аленов, Т.А. Апендиев
Верстка на компьютере А.М. Кульгинбаевой

Подписано в печать 2016.
Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.
4 п.л. Тираж 300. Заказ 6.

*Национальная академия наук РК
050010, Алматы, ул. Шевченко, 28, т. 272-13-18, 272-13-19*