

Облікова картка НДДКР

Державний обліковий номер: 0216U005850

Державний реєстраційний номер: 0111U002161

Відкрита

Дата реєстрації: 29-02-2016



1. Етапи виконання

Номер етапу: 1

Назва етапу: Вплив дефектів радіаційної природи на фізичні властивості елементарних напівпровідників та композитних наноструктур (Si-Ge, AlGaIn/GaN, вуглецеві нанотрубки).

Початок етапу: 01-2011

Закінчення етапу: 12-2015

Вид звітнього документа: Остаточний звіт

2. Виконавець

Назва організації: Інститут фізики НАН України

Код ЄДРПОУ/ІПН: 05417302

Підпорядкованість: Національна академія наук України

Адреса: 03680, МСП, м.Київ, проспект Науки, 46

Телефон: 525-12-20

E-mail: fizyka@iop.kiev.ua

3. Власник результатів НДДКР (продукції)

Назва організації: Інститут фізики Національної академії наук України

Код ЄДРПОУ/ІПН: 05417302

Адреса: проспект Науки, 46, м. Київ, Київська обл., 03680, Україна

Підпорядкованість: Національна академія наук України

Телефон: 380445251220

Телефон: 380445251589

E-mail: fizyka@iop.kiev.ua

WWW: <http://www.iop.kiev.ua>

4. Джерела та напрями фінансування

Підстава для проведення робіт: 34 - договір (замовлення) з центральним органом виконавчої влади, академією наук (головними розпорядниками бюджетних коштів на проведення НДДКР)

КПКВК: 6541030

Напрямок фінансування: 2.1 - фундаментальні дослідження

Джерела фінансування

Джерело фінансування: 7713 - кошти держбюджету

Фактичний обсяг фінансування за звітний етап: 5110.9 тис. грн.

5. Науково-технічна робота

Назва роботи (укр)

Вплив дефектів радіаційної природи на фізичні властивості елементарних напівпровідників та композитних наноструктур (Si-Ge, AlGa_N/Ga_N, вуглецеві нанотрубки).

Назва роботи (англ)

Influence of radiation defects on physical properties of elementary semiconductors and composite nanostructures (Si-Ge, AlGa_N/Ga_N, carbonic nanjtubes).

Реферат (укр)

Об'єктом дослідження є германій, кремній з високим вмістом бору, нітрид галію, вуглецеві нанотрубки. Метою досліджень є встановлення ролі власних міжвузельних атомів і вакансій у формуванні дефектів в германії, розробка методів цілеспрямованої зміни електричних і оптичних властивостей германію; вивчення транспортних явищ в нітридних гетероструктурах в сильних електричних полях; вивчення впливу умов опромінення на електрофізичні та сорбційні властивості вуглецевих нанотрубок та структур з їх пучків. Методи дослідження: інфрачервона Фур'є спектроскопія, ефект Хола, вольт-амперні характеристики та провідність в імпульсному режимі, шумова спектроскопія. Встановлено, що легування Ge ізовалентною домішкою - оловом, докорінно змінює канали реакцій за участю власних вакансій і міжвузлових атомів. Під час опромінення вакансії V ефективно взаємодіють з атомами олова з утворенням центрів SnV і SnV₂. Це приводить до значного зниження ефективності утворення основних рекомбінаційних центрів, дивакансій і вакансія + кисень, причому останній виникає лише при температурах вищих за 310 K, що свідчить про нерухомість вакансій до цих температур, і існує в значно вужчому інтервалі температур (310-380 K) ніж в нелегованому Ge (80-420 K). Нерухомість вакансій до високих температур дала можливість експериментально підтвердити, що власний міжвузловий атом I в Ge стає рухливим при температурах T 180 K. Показано, що при дифузії I ефективно взаємодіють з киснем з утворенням центрів IO. Відпал центрів IO відбувається за двома механізмами: дисоціацією і дифузією. Дисоціація IO супроводжується захопленням вивільнених I іншими центрами IO з утворенням комплексів I₂O. При дифузії IO взаємодіють з центрами вакансія + кисень, що приводить до зростання концентрації димерів O₂. Ідентифіковано лінії поглинання, що відповідають кожному із дефектів, які містять власні міжвузлілля і кисень. Досліджено залежність швидкості електронів в гетероструктурах на основі GaN від напруженості електричного поля до 0.3 МВ/см. Отримана швидкість $6.8 \cdot 10^7$ см/сек відповідає квазібалістичному руху електрона і перевищує відомі на сьогодні швидкості в напівпровідниках, що дозволяє істотно збільшити швидкодію приладів на основі GaN. Експериментально виявлено, що у вуглецевих нанотрубках реалізується перенос електричного заряду за моделлю електронної рідини Томанагі-Латтинжера незалежно від виду опромінення (гама кванти, високоенергетичні електрони) та оточуючого середовища (вакуум, водень). За допомогою шумової спектроскопії виявлено, що провідність пучків металевих вуглецевих нанотрубок в залежності від температури змінюється від стрибкової (4.2-20 K) до квантової за механізмом рідини Латинжера (20-200 K) і до дифузійної (200-300 K). Розвинуто теорію утворення радіаційних дефектів при опроміненні ВНТ у газовому середовищі, згідно якої високоенергетична частинка спочатку передає енергію атому газу, який в подальшому взаємодіє з поверхнею нанотрубки з утворенням дефектів. Такий механізм може реалізовуватись крім ВНТ при опроміненні графену та наночастинок. Експериментально та теоретично показано, що ефективність дефектоутворення немонокотонно залежить від маси атомів газового оточення використаного при опроміненні. Досліджено кінетику десорбції ізотопів гелію (³He та ⁴He) та молекул водню H₂ і дейтерію D₂ із в'язок вуглецевих нанотрубок. Встановлена залежність температури переходу від класичної дифузії до квантової від атомної маси газу. Експериментально доведено, що критична температура переходу від класичної дифузії до квантової, є оберненою функцією маси атомів або молекул газу. Всі вищенаведені результати не були відомими в міжнародній літературі до теперішнього часу. Результати роботи можуть бути використані при розробці технології виготовлення приладів твердотільної електроніки із заданими параметрами та підвищеною стійкістю до впливу іонізуючого опромінення. Реалізація в приладах на нітридних гетероструктурах високих швидкостей носіїв струму є істотним кроком до опанування терагерцевого діапазону частот. Результати отримані при дослідженні електричних властивостей вуглецевих нанотрубок, опромінених в різних газових середовищах є важливими з огляду на практичне застосування радіаційних технологій для модифікації властивостей вуглецевих нанотрубок, які широко використовуються

для створення новітніх твердотільних приладів та у водневій енергетиці.

Реферат (англ)

The object of the research is germanium, heavily boron-doped silicon, gallium nitride, carbon nanotubes. The aim of the research is the establishment the role of intrinsic interstitials and vacancies in the formation of defects in germanium; the development of the method for controllable change electrical and optical properties of germanium; the study the charge transport phenomena in nitride heterostructures in strong electric fields; the investigation the radiation influence the electrical and sorption properties of single carbon nanotubes and their bundles. Methods: Fourier transform infrared spectroscopy, Hall effect, current - voltage characteristics and conductivity in pulsed mode, noise spectroscopy. It was established that doping of Ge with tin drastically changes the reactions involving intrinsic vacancies and interstitials. Upon the irradiation vacancies V effectively interact with tin atoms and form with them SnV and SnV₂ centers. This leads to a significant reduction in the introduction efficiency of the main recombination centers: divacancies and vacancy+oxygen. Important, that vacancy+oxygen centers occur only at temperatures higher than 310 K what indicates that vacancies are immobile up to this temperature. Besides, the vacancy+oxygen complexes exist in much narrow temperature range (310 380 K) than in undoped Ge (80 420 K). The vacancies immobility up to high temperatures enables us to confirm experimentally that intrinsic interstitial atoms I in Ge become mobile at temperatures $T > 180$ K. It is shown that during diffusion I atoms efficiently interact with oxygen with formation of IO centers. It was found that annealing of IO occurs by both dissociation and diffusion. The IO dissociation is accompanied by recapture of the released I atoms by another IO centers with formation of I₂O complexes. Diffusing IO interact with vacancy+oxygen centers what leads to an increase of the dimers O₂ concentration. The absorption lines corresponding to defects involving intrinsic interstitial and oxygen atoms are identified. The dependence of the electron velocity in GaN heterostructures on the electric field intensity up to 0.3 MV/cm are investigated. The revealed value for velocity is $6.8 \cdot 10^7$ cm/sec what corresponds to the quasi ballistic electron motion and exceeds the ones which today are known for semiconductors. Such high velocity gives an opportunity to increase the performance of modern GaN - based devices. It was experimentally found that electron transport in carbon nanotubes follows Tomonaga Luttinger liquid model regardless on the type of radiation (gamma quanta, high-energy electrons) and environment (vacuum, hydrogen). With the use of noise spectroscopy we have found that conductivity mechanism in carbon nanotubes changes with the temperature from hopping (4.2 20 K) up to quantum through Tomonaga Luttinger liquid mechanism (20 200 K) and then, at higher temperatures, to the diffusion mechanism (200 300 K). The theory of radiation defects formation in carbon nanotubes when irradiated in a various gaseous environment was developed. According to this theory the high-energy particles initially transfer the energy to the gas atom which subsequently interacts with the surface of the nanotubes to form defects. The such mechanism could be implemented during irradiation of graphene and nanolayers also. It was experimentally and theoretically shown that the effectiveness of defects creation no monotonously depends on the mass of the atoms of gas environment. The desorption kinetics of helium isotopes (³He and ⁴He), molecules of hydrogen H₂ and deuterium D₂ from carbon nanotube bundles was investigated. The dependence of the temperature for transition from the classical to the quantum diffusion on the atomic mass of gas is determined. Experimentally shown, that this temperature follows linear dependence against the inverse mass of gas molecule and this is consistent with the theoretical prediction. All the above results were not known in the literature up to date. The obtained results can be used in the development of technology production of the devices for solid state electronics with preset parameters and increased resistance to the effects of ionizing radiation. The implementation of the high electron velocity in GaN heterostructures devices will be the essential progress in high speed (terahertz frequency range) electronics. Results obtained in the study of electrical properties of carbon nanotubes irradiated in various gas environments are important in view of the practical application of radiation technologies for modifying the properties of carbon nanotubes, which are widely used to create a new solid-state devices of nanoelectronics and in hydrogen energy technologies.

Індекс УДК: 538.97-405, 538.97-405

Коди тематичних рубрик НТІ: 29.19.25

6. Науково-технічна продукція (НТП)

НТП 1

Назва продукції (укр): Фізичні властивості монокристалічного Ge, Si, AlGaIn/GaN, вуглецевих нанотрубок. Рекомендації щодо природи радіаційних дефектів та ступеню їх впливу на електрофізичні властивості вказаних перспективних матеріалах мікро- та нанoeлектроніки та методів підвищення їх радіаційної стійкості.

Назва продукції (англ): Physical properties of the single crystalline Ge, Si, AlGaN/GaN and carbon nanotubes.

Recommendations relating to the nature of the radiation defects and their influence the electrophysical properties of these advanced materials micro- and nanoelectronics and methods to enhanced of their radiation stability.

Очікувані результати:

Галузь застосування: 73.10.1 Дослідження і розробки в галузі природничих наук

Опис продукції (укр): Встановлено, що легування германію оловом кардинально змінює реакції за участю власних міжвузельних атомів і вакансій при опроміненні високоенергетичними електронами і може бути використано як метод керованого впливу на реакції між компонентами пар Френкеля і домішками в ґратці. Під час опромінення вакансії V ефективно взаємодіють з атомами олова з утворенням центрів SnV і SnV₂. Це приводить до значного зниження ефективності утворення основних рекомбінаційних центрів, дивакансій і вакансія + кисень, причому останній виникає лише при температурах вищих за 310 K, що свідчить про нерухомість вакансій до цих температур. Нерухомість вакансій до високих температур дала можливість експериментально підтвердити, що власний міжвузловий атом I в Ge стає рухливим при температурах T 180 K. Показано, що власні міжвузлія ефективно взаємодіють з киснем з утворенням центрів IO, які в свою чергу трансформуються в IO₂. Встановлено механізми утворення міжвузловинних дефектів в германії. Виявлено рекомбінаційно-прискорену д

Соціально-економічна спрямованість НТП:

Стадія завершеності НТП: Звіт по НДДКР

Впровадження НТП: Впроваджено

Строки впровадження: 2 - 3 роки.

Виробник продукції: Інститут фізики НАН України

Споживачі продукції: ІФП НАН України, ІМФ НАН України, ФТІНТ НАН України, педагогічні ВУЗИ та Університети

Перспективні ринки: Країни ЄС, США та Японія.

Права інтелектуальної власності: За договорами

Форми та умови передачі продукції: Спільні НДДКР

7. Бібліографічний опис

B.A. Danichenko, N.A. Tripachko, E.A.Voytsihovska, I.A. Obukhov, I.I. Yaskovets, B. Sundqvist. Self-heating of metallic carbon nanotube bundles in the regime of the Luttinger-liquid conductivity Low Temperature Physics - 37, 710-717 (2011); B.A. Danilchenko, A.P. Budnyk, L.I. Shpinar, I.I. Yaskovets, K.W.J. Barnham, N.J. Ekins- Daukes. Radiation resistance of GaAs solar cells and hot carriers Solar Energy Materials and Solar Cells - 95, 2551-2556 (2011); A.V. Dolbin, V.B. Essel'son, V.G. Gavrillko, V.G. Manzhelii, N.A. Vinnikov, S.N. Popov, B.A. Danilchenko N.A. Tripachko. Hydrogen sorption and radial thermal expansion of bundles of single-walled nanotubes irradiated by γ -rays in hydrogen atmosphere" Low Temperature Physics - Vol. 37, 744-751 (2011); J.Iu. Nasieka, L. Rashkovetskyi, O. Strilchuk, B. Danilchenko. Gamma-stimulated change of the photoluminescence properties of Cd_{1-x}Zn_xTe thin films. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment - Vol. 648, 290-292 (2011); B.A. Danilchenko, N.A. Tripachko, S. Lev, M.V. Petrychuk, V.A. Sydoruk, B. Sundqvist, S.A. Vitusevich. 1/f noise and mechanisms of the conductivity in carbon nanotube bundles Carbon - Vol. 49, 5201-5206 (2011); K.f Mleczko, Z. Zawislak, A. Kolek, B. Danilchenko, O. Voitsihovska. Electron radiation effects on RuO₂-based thick-film temperature sensors. Optica Applicata - Vol. XLI, 455 462 (2011); A.M.Крайчинський, М.М. Красько, А.Г. Колосюк, Р.В. Петруня, В.Ю. Поварчук, В.В. Войтович, В.Б. Неймаш, В.А. Макара, Р.М. Руденко. Механізм відпалу VO дефектів в n-Si при високотемпературному імпульсному електронному опроміненні. Укр. Фіз. Журн. - Т. 56, 926-932 (2011); A. Kraitichinskii, A. Kolosiuk, M. Kras'ko, V. Neimash, V. Voitovych, V. Makara, R. Petrunya, S. Putselyk. Vacancy generation in silicon in the temperature range 100-633 K under electron irradiation". Radiation Effects and Defects in Solids: Incorporating Plasma Science and Plasma Technology - Vol. 166, 445 450 (2011); L.I. Khirunenko, Yu.V. Pomozov, M.G. Sosnin, A.V. Duvanskii. Boron-Oxygen-Related Defect in Silicon. Solid State Phenomena Vols. 178 179, 178 182 (2011); E. Belyaev, N.I. Klyui, R.V. Konakova, A N. Lukyanov, B.A. Danilchenko, J.N. Sveshnikov, A N. Klyui. Electreflectance study of the effect of γ radiation on the optical properties of epitaxial GaN films Semiconductors Vol. 46, 302 305 (2012); V.K. Malyutenko, A.N. Tykhonov, O.Yu. Malyutenko, I.S. Rohutskii, B.A. Danilchenko. Silicon coding-decoding photonic device by electron irradiation and light down conversion. Appl. Phys. Lett. - Vol. 101, 181114(1-3) (2012); Jing Li, S.Vitusevich, M. Petrychuk, S. Pud, V. Sydoruk, B. Danilchenko, A. Offenh?usser. Transport and noise properties of Si nanowire channels with different lengths before and after gamma radiation treatment AIP

Conf. Proc. – Vol. 1566, 389 (2013); B.A. Danilchenko, N.A. Tripachko, I.Y. Uvarova, I. I. Yaskovets. Novel mechanism of damage introduction into carbon nanotubes caused by irradiation in gas medium. *Physica Status Solidi B* – Vol. 250, 1488-1491 (2013); S. Pud, J. Li, M. Petrychuk, S. Feste, S. Vitusevich, B. Danilchenko, A. Offenh?usser, S. Mantl. Modulation phenomena in Si nanowire field-effect transistors characterized using noise spectroscopy and gamma radiation technique. *Journal of Applied Physics* – Vol. 113, 124503(1-10) (2013); A.V. Dolbin, V.B. Esel'son, V.G. Gavrilko, V.G. Manzhelii, N.A. Vinnikov, I.I. Yaskovets, I.Yu. Uvarova, N.A. Tripachko B.A. Danilchenko. Hydrogen sorption by the bundles of single-wall carbon nanotubes, irradiated in various gas media. *Low Temperature Physics* – Vol. 39, 610 617 (2013); B.A. Danilchenko, N.A. Tripachko, E.A. Voitsihovska, I.I. Yaskovets, I.Y. Uvarova, B. Sundqvist. Stability of the Tomonaga-Luttinger liquid state in gamma-irradiated carbon nanotube bundles. *Journal of Physics: Condensed Matter* – Vol. 25, 475302(1-7) (2013); J. Li, S.A. Vitusevich, M.V. Petrychuk, S. Pud, A. Offenh?usser, B.A. Danilchenko. Advanced performance and scalability of Si nanowire field-effect transistors analyzed using noise spectroscopy and gamma radiation techniques. *Journal of Applied Physics* – Vol. 114, 203704(1-10) (2013); S. Vitusevich; J. Li; S. Pud; A. Offenh?usser; M. Petrychuk; B. Danilchenko. Si nanowire field effect transistors: Effect of gamma radiation treatment *Proc. of the 22nd International Conference Noise and Fluctuations (ICNF)*, 24 28, (2013); I.Y. Uvarova, R.M. Basnukaeva, A.V. Dolbin, B.A. Danilchenko. Hydrogen storage capacity of carbon nanotubes ? - Irradiated in hydrogen and deuterium media. *Proc. of the 36th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)* 309313(1-5); J. Iu, Nasieka, L. Rashkovetskyi, M. Boyko, V. Strelchuka, Z. Tsybriia, B. Danilchenko, L. Shcherbak. Low-temperature photoluminescence analysis of the ?-irradiation effect on the defect structure in Ge-doped CdTe single crystals. *Journal of Luminescence* – Vol. 144, 112-116 (2013); B.A. Danilchenko, N.A. Tripachko, A.E. Belyaev, S.A. Vitusevich, H. Hardtdegen, H. L?th. High-field quasi-ballistic transport in AlGaIn/GaN heterostructures. *Appl. Phys. Lett.* – Vol. 104, 072105(1-5) (2014); V.A. Sydoruk, K. Go?, C. Meyer, M.V. Petrychuk, B.A. Danilchenko, P. Weber, C. Stampfer, J. Li, S.A. Vitusevich. Low-frequency noise in individual carbon nanotube field-effect transistors with top, side and back gate configurations: effect of gamma irradiation. *Nanotechnology* – Vol. 25, 035703(1-5) (2014); Iu. J. Nasieka, L. Rashkovetskyi, M. Boyko, V. Strelchuk, Z. Tsybrii, B. Danilchenko, L. Shcherbak. Photoluminescence study of ?-irradiation effect on the defect structure in Ge-doped CdTe single crystals. *Physica Status Solidi C* – Vol. 11, 1510-1514 (2014); B.A. Danilchenko, I.I. Yaskovets, I.Y. Uvarova, A.V. Dolbin, V.B. Esel'son, R.M. Basnukaeva and N.A. Vinnikov. Tunneling effects in the kinetics of helium and hydrogen isotopes desorption from single-walled carbon nanotube bundles. *Appl. Phys. Lett.* – Vol. 104, 173109(1-4) (2014); J. Iu, Nasiekaa, M. Boyko, V. Strelchuk, B. Danilchenko, L. Rashkovetskyi, P. Fochuk. Gamma-irradiation effect on electron-phonon coupling in Ge-doped CdTe crystals: Raman and photoluminescence study. *Solid State Communications* – Vol. 196, 46-50 (2014); A.V. Dolbin, V.B. Esel son, V.G. Gavrilko, V.G. Manzhelii, N. A. Vini kov, R.M. Basnukaeva, I.I. Yaskovets, I.Yu. Uvarova and B.A. Danilchenko. Kinetics of ³He, ⁴He, H₂, D₂, Ne, and N₂ sorption by bundles of single-walled carbon nanotubes. Quantum effects. *Low Temperature Physics* – Vol. 40, 246 250 (2014); I.Y. Uvarova, R.M. Rudenko, E.A. Voitsihovska, I.I. Yaskovets, B.A. Danilchenko. Accumulation and recovery of radiation-induced damages in single-walled carbon nanotube bundles. *Proc. of the 37th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, 375 379, (2014); А.М.Крайчинський. Радіаційні ефекти в монокристалічному кремнії. Монографія, Київ Наукова думка (2014); A. Je?owski, O. Churiukova, J. Mucha, T. Suski, I.A. Obukhov, B.A. Danilchenko. Thermal conductivity of heavily doped bulk crystals GaN:O. Free carriers contribution. *Materials Research Express* – Vol. 2, 085902(1-7) (2015); L.I. Khirunenko, Yu.V. Pomozov, M.G. Sosnin, A.V. Duvanskii. Boron-Oxygen-Related Defect in Silicon. *Solid State Phenomena* -Vols. 178-179, 178-182 (2011); L.I. Khirunenko, Yu.V. Pomozov, M.G. Sosnin, N.V. Abrosimov, H. Riemann. Peculiarities of Formation and Annealing of VO-Related Defects in Ge Doped with Tin. *Solid State Phenomena* Vols. 178 179, 166 171 (2011); N.A. Sobolev, A.E. Kalyadin, L.I. Khirunenko, E.I. Shek, V.I. Vdovin, D.I. Tetel'baum. Luminescent and structural properties of self-implanted silicon layers in relation to their fabrication conditions. *Solid State Phenomena* Vols. 178 179, 341 346 (2011); Л.И. Хируненко, Ю.В. Помозов, М.Г. Соснин. Оптические свойства кремния с высоким содержанием бора. *ФТП* – Т. 47, 233 238 (2013); L.I. Khirunenko, Yu.V. Pomozov, M.G. Sosnin, N.V. Abrosimov, H. Riemann. Vacancy-related defects in Ge doped with tin. *Solid State Phenomena* Vols. 205 206, 412 416 (2014); L.I. Khirunenko, Yu.V. Pomozov, M.G. Sosnin, N.V. Abrosimov, H. Riemann. Complexes of Self-Interstitials with Oxygen Atoms in Ge AIP Conference Proceedings – Vol. 1583, 100 104 (2014); L.I. Khirunenko, Yu.V. Pomozov, M.G. Sosnin, N.V. Abrosimov, H. Riemann. The Interaction Between Divacancies and Shallow Dopants in Irradiated Ge:Sn. AIP Conference Proceedings – Vol. 1583, 75 79 (2014); Zaets, O. Podolich, O. Kukharenko, G. Reshetnyak, M. Sosnin, L. Khirunenko, N. Kozyrovska, J.-P. de Vera. Bacterial cellulose may provide the microbial-life biosignature in the rock records. *Advances in Space Research* – Vol. 53, 828 835 (2014).

8. Звітна документація

Кількість сторінок в звіті: 133

Мова звіту: Українська

Кількість файлів у звіті: 1

9. Заключні відомості

Перелік осіб-виконавців

Войцехівська Олена Олександрівна

Данильченко Борис Олександрович

Дуванський Андрій Володимирович

Крайчинський Анатолій Миколайович

Лев Сергій Богданович

Самочерних Сергій Володимирович

Соснін Михайло Георгійович

Трипачко Микола Олександрович

Хіруненко Людмила Іванівна

Яскевець Іван Іванович

Керівник організації:

Яценко Леонід Петрович

Керівники роботи:

Данильченко Борис Олександрович

Керівник відділу реєстрації наукової діяльності
УкрІНТЕІ



Юрченко Т.А.