

Фізичні принципи створення нових елементів оптично-електронних приладів на базі моно- та нанокристалічного карбїду кремнію

Физические принципы создания новых элементов оптико-электронных приборов на базе моно- и нанокристаллического карбида кремния

Physical principles of creation of new elements of optically-electronic devices on a base mono- and nanocrystallical silicon carbide

1. Номер державної реєстрації: 0115U000209.

**2. Науковий керівник д.т.н., проф. Воронов Сергій Олександрович;
Воронов Сергей Александрович, Voronov Sergey Alexandrovich**

3. Суть розробки, основні результати.

(укр.)

Дослідженні фізико-технологічні проблеми створення джерел випромінювання та фотоприймачів, що використовують явище електричного пробою для застосування їх у оптично-електронних приладах. Використання при цьому карбїду кремнію з його унікальними властивостями дозволяє вирішити актуальну проблему створення радіаційно стійкої, високотемпературної елементної компонентної бази для систем атомної промисловості, ядерної енергетики, воєнної та космічної техніки.

Особливістю структурних модифікацій карбїду кремнію є наявність, окрім основної періодичності, яка дорівнює сталій ґратки, додаткової періодичності (надґратки), яка суттєво змінює характер електронних процесів у великих електричних полях, а також спричиняє виникнення нових ефектів, надзвичайно цікавих з наукової та практичної точки зору.

З'ясовані механізми та особливості впливу нанорозмірної кристалічної надструктури на електронну зонну структуру різних політипів SiC та на основні характеристики електричного пробою *p-n*-структур на базі моно- та нанокристалічного карбїду кремнію. Це дозволило пояснити спектральні і поляризаційні характеристики окремих мікронних ділянок локалізованого пробою – мікроплазм та їх залежність від температури, політипу SiC, кристалографічного напрямку електричного поля та отримати з цих даних нові відомості про природу основних смуг випромінювання.

Визначено характер розподілу по енергіям високоенергетичних носіїв заряду, інтенсивність іонізаційних процесів, співвідношення електронної та діркової іонізації при пробої.

Запропоновано модель “ідеального” точкового джерела оптичного випромінювання, для якого реалізовано нові методики та уперше проведено детальне дослідження впливу технологічних факторів, температури, радіаційного опромінення на електричні, флуктуаційні, електролюмінісентні, поляризаційні характеристики.

Запропоновано нові технологічні методи покращення мікроплазмової структури пробою *p-n*-переходів, отриманих за допомогою методу іонної

імплантації іонів Al^{3+} у підігріті до $2000 \div 2300$ К плівки SiC-6H. Доведена перспективність створення на цій основі еталонних широкосмугових джерел оптичного випромінювання на діапазон $250 \div 1000$ нм.

Розроблені лабораторні зразки еталонних джерел імпульсного випромінювання з субнаносекундною швидкістю дії, високою температурною та часовою стабільністю.

(рос.)

Исследованы физико-технологические проблемы создания источников излучения и фотоприемников, которые используют явление электрического пробоя для применения их в оптико-электронных приборах. Использование при этом карбида кремния с его него уникальными свойствами позволяет решить актуальную проблему создания радиационно стойкой, высокотемпературной элементной базы для систем атомной промышленности, ядерной энергетики, военной и космической техники.

Особенностью структурных модификаций карбида кремния есть наличие, кроме основной периодичности, которая определяет постоянную решетки, дополнительной периодичности (сверхрешетки), существенно изменяющей характер электронных процессов в больших электрических полях, а также вызывающей возникновение новых эффектов чрезвычайно интересных с научной и практической точки зрения.

Выявлены механизмы и особенности влияния наноразмерной кристаллической сверхструктуры на электронную зонную структуру разных політипів SiC и на основные характеристики электрического пробоя $p-n$ -структур на базе моно- и нанокристаллического карбида кремния. Это позволило объяснить спектральные и поляризационные характеристики отдельных микронных участков локализованного пробоя – микроплазм и их зависимость от температуры, політипа SiC, кристаллографического направления электрического поля и получить из этих данных новые сведения о природе основных полос излучения.

Определен характер распределения по энергиям высокоэнергетических носителей заряда, интенсивность ионизационных процессов, соотношения электронной и дырочной ионизации при пробое.

Предложена модель "идеального" точечного источника оптического излучения, для которого реализованы новые методики и впервые проведено детальное исследование влияния технологических факторов, температуры и радиационного облучения на электрические, флуктуационные, электролюминисцентные и поляризационные характеристики.

Предложены новые технологические методы улучшения микроплазменной структуры пробоя $p-n$ -переходов, полученных с помощью метода имплантации ионов Al^{3+} в подогретые до $2000 \div 2300$ К пленки SiC-6H. Доказана перспективность создания на этой основе еталонных широкополосных источников оптического излучения на диапазон $250 \div 1000$ нм. Разработаны лабораторные образцы еталонных источников импульсного

излучения с субнаносекундной скоростью действия, высокой температурной и часовой стабильностью.

(англ.)

Physical and technological problems of creation of optical radiators and photodetectors, which use the phenomenon of electrical breakdown for its application in optical-electronic devices, are investigated. The usage of silicon carbide with its super-unique properties allows to solve the actual problem of creating of radiation stable, high temperature element basis for the systems of atomic industry, nuclear energy, military and space techniques. The feature of structural modifications of silicon carbide is presence, except basic periodicity, which determines the lattice constant of additional periodicity (superlattice), substantially changing the character of electronic processes in the large electric fields and also causes the origin of new effects, extremely interesting from the scientific and practical points of view.

The mechanism and features of influence of the nanosize crystalline overstructure on the electronic zone structure of different polytypes SiC and on the basis characteristics of electrical breakdown of p-n structures on the basis of mono- and nano-crystalline silicon carbide are developed. It allowed to explain spectral and polarizational characteristics of separate micronic areas of local breakdown of microplasmas and their temperature dependence, crystallography direction of electric-field and to get from these data new information about the nature of basic bands of radiation. The character of energy distribution on the charge of high-energy carriers, intensity of ionization processes, correlations of electronic and hole-type ionising at the breakdown are determined.

The suggested model of "ideal" point source of optical radiation, for which new methodologies are realized for the first time and a detailed study of influence of technological factors, temperature, hard radiation on electric, fluctuational, electroluminiscent, polarizational characteristics are undertaken. The new technological methods of improvement of structure of breakdown of p-n junction produced with the help of Al³⁺ implantation in warmed up to 2000-2300 K film of SiC - 6H are suggested. The perspective of creation on this basis standard broadband sources of optical radiation in the range of 250-1000 nm is proved. Laboratory standards of sources of radiation with subnanosecond pulses, high temperature and long-term stability are developed.

4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності. Заявка на патент: Пристрій на основі карбіду кремнію для оцінки параметрів систем фотозйомки мікрооб'єктів.

5. Порівняння зі світовими аналогами. Робота відповідає світовому рівню. У роботі уперше проведене детальне комплексне дослідження мікроплазмової структури пробою в *p-n*-переходах на основі поширених політипів карбіду кремнію. Отримані дані розширюють уявлення про властивості наноструктур у великих електричних полях, а також можуть

стати основою для створення “ідеальних” точкових джерел оптичного випромінювання.

Нова методика аналізу експериментальних даних, дозволила зробити висновки щодо типів електронних випромінювальних переходів та оцінити вплив нанорозмірної шаруватої кристалічної будови політипів карбїду кремнію на випромінювальні електронні процеси у пробійних електричних полях. Отримані результати застосовано для оптимізації технології та режимів експлуатації високостабільних широкосмугових випромінювачів на діапазон 250 – 800 нм. На основі оригінальної методики, отримано спектральні розподіли ступеню лінійної поляризації пробійної електролюмінісценції *p-n*-структур на основі поширених політипів SiC відносно кристалографічної осі C. Це дозволило розширити уявлення про вплив розмірних ефектів на електронні процеси у великих електричних полях та створити нові елементи фотоніки – еталонні джерела випромінювання з відомим станом лінійної поляризації, а також деполаризованого випромінювання. Оригінальним явищем, виявленим уперше є осцилююча структура у спектрах випромінювання окремих мікроплазм, характеристики якої детально досліджені у даній роботі. На основі проведених досліджень розроблені лабораторні зразки випромінювачів на основі карбїду кремнію, що працюють у режимі електричного пробою, на діапазон 250 – 700 нм з субнаносекундною швидкодїєю і високою температурною стабільністю, а також точкові джерела оптичного випромінювання з розміром зони світіння порядку 0,1 – 1 мкм;

6. Економічна привабливість для просування на ринок (вартість реалізації проекту, терміни впровадження та окупності, показники).

Використання напівпровідникового карбїду кремнію дозволяє вирішити актуальну проблему створення радіаційно стійкої, високотемпературної елементної компонентної бази для розвитку стратегічно значущих систем атомної промисловості, ядерної енергетики, оптоелектроніки, воєнної та космічної техніки. Цьому сприяють його унікальні властивості: велика ширина забороненої зони (2,3 – 3,3 еВ для різних політипних форм), надзвичайно високе поле лавинного пробою (2 – 5 МВ/см), велика теплопровідність (3 – 5 Вт/см К), механічна міцність та хімічна інертність та інші. Прогрес у технології матеріалу забезпечив у минулому році об'єм продажу виробів з монокристалічного SiC близько 5 млрд. доларів.

7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, відомства, підприємства, організації).

Запропоновані джерела оптичного випромінювання можуть знайти використання у техніці експерименту, приладобудуванні, космічній техніці та інших галузях. Зокрема, точкові джерела оптичного випромінювання можна використати для імітації зірок у космічних системах, для тестування та калібрування оптичних систем та систем реєстрації зображення з максимально високим розрізненням, які використовуються, зокрема, у

військових пристроях наведення та розвідки. Джерела імпульсного випромінювання можна використати для калібрування сцинтиляційних та черенковських детекторів у масштабних ядерно-фізичних експериментах та для вирішення багатьох інших задач. Одержані нові данні, що розширюють уявлення про властивості наноструктурних матеріалів у пробійних електричних полях та можуть бути використані для створення нових приладів, що використовують явище електричного пробою.

8. Стан готовності розробки.

Розроблені лабораторні зразки еталонних широкосмугових джерел випромінювання на діапазон $250 \div 1000$ нм з високою температурною та часовою стабільністю та з субнаносекундною швидкістю дії; зразки «ідеальних» точкових джерел оптичного випромінювання з розміром зони випромінювання порядку $0,1 - 1$ мкм;

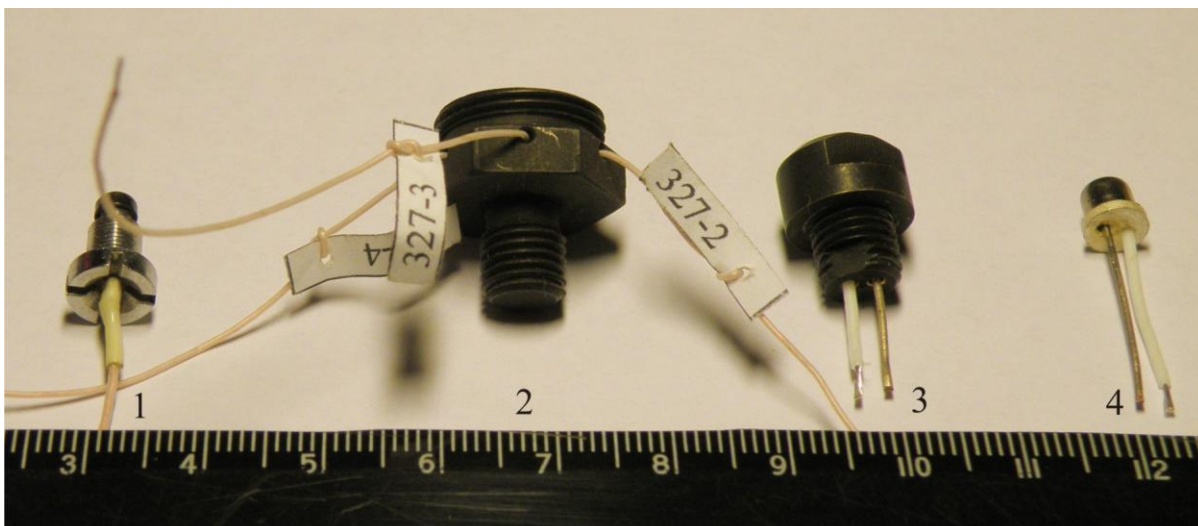
9. Існуючі результати впровадження.

Лабораторні зразки випромінювачів на основі карбїду кремнію, що працюють у режимі електричного пробою, впроваджено на Державному підприємстві “Науково-дослідний інститут мікроприладів” для градування по чутливості спектральної апаратури у діапазоні $300 - 700$ нм. Використання зразка підвищило точність градування та зменшило вартість і трудомісткість робіт у порівнянні із використанням для цієї ж мети світловимірвальних еталонних ламп розжарювання. У наявності є акт про впровадження.

Лабораторні зразки випромінювачів на основі карбїду кремнію, що працюють у режимі електричного пробою, використано для калібрування реєструючої системи бортового УФ поляриметра, призначеного для дослідження атмосферних аерозолів. Розробка цього приладу виконувалася сумісно Головною астрономічною обсерваторією НАНУ та ПБФ НТУУ “КПІ”. У наявності рекламний проспект на виставці НТУУ “КПІ”.

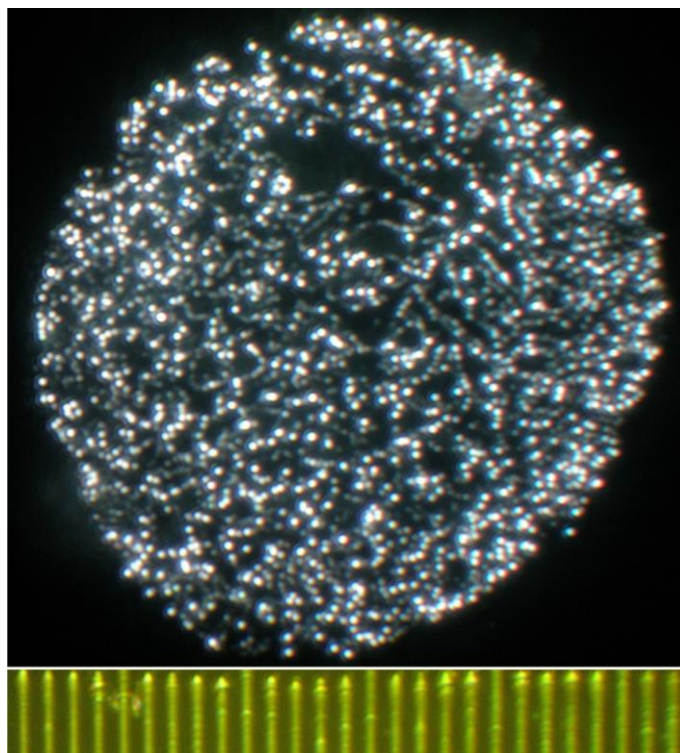
10. Назва підрозділу, телефон, e-mail. КПІ ім. Ігоря Сікорського, Фізико-математичний факультет, кафедра загальної фізики та фізики твердого тіла, тел.204-80-79, 095-844-93-25. S.Voronov@kpi.ua

11. Фото розробки



- 1 – світлодіодний імітатор випромінювання зірок;
- 2 – еталонний широкосмуговий випромінювач на діапазон 250–700 нм;
- 3 – імпульсний випромінювач з радіатором;
- 4 – імпульсний випромінювач.

Рисунок 1 – Високостабільні, широкосмугові, швидкодіючі джерела оптичного випромінювання на основі явища електричного пробою у $p-n$ -структурах на карбіді кремнію.



10 мкм на поділку

Рисунок 2 – Однорідна мікроплазмова структура пробою у $p-n$ -переході на основі карбиду кремнію

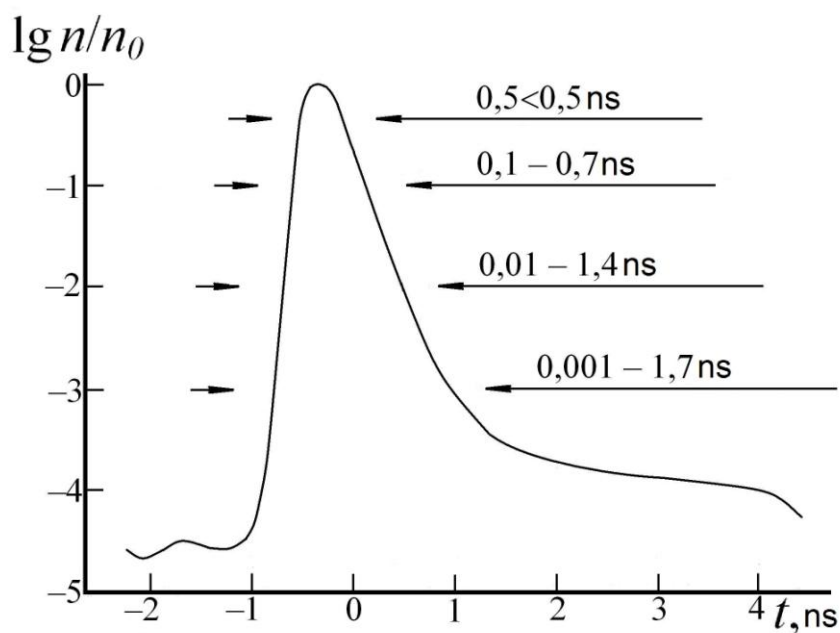


Рисунок 3 – Імпульс випромінювання еталонного джерела на основі SiC

12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання (вагомі монографії, підручники, посібники, наукові статті, дисертації, інші публікації).

Посібники

1. Богорош О. Т., Воронов О. С., Гірка І. О. та ін./ Фізика (під загальною редакцією акад. НАНУ Бар'яхтара В. Г.)// Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна, 2016.- С. 1 – 523. Рекомендовано МОН України (прот.№ 10 від 30.10.10).
2. Богорош О.Т., Воронов С.О., Крамар В.М., Шайко-Шайковський О.Г. / Від традиційних до нових матеріалів, ч. 1 // Навчальний посібник для студентів ВНЗ НТУУ КПІ, Чернівецький національний університет Чернівці. ЧНУ, 2015, 396 с.
3. Богорош О.Т., Воронов С.О., Крамар В.М., Шайко-Шайковський О.Г. / П'єзо – та сегнетоматеріали, ч.2 // Навчальний посібник для студентів ВНЗ НТУУ КПІ, Чернівецький національний університет, 2016, - 368 с. Затверджено Вченою Радою ФТТ «КПІ» НТУУ. Рекомендовано МОН України. Лист від 17.11.2010 №1/11-10614
4. Богорош О. Т., Воронов О. С., Шайко-Шайковський О.Г., Маїк В.З., Ясінський М.Ф. / Прикладна фізика, українсько-російсько-англійський тлумачний словник, том 1-4 // Українська академія друкарства, м. Львів, 2015, том 1, А-Ж, - 584 с. Том 2, З – Н, - 664 с.; том – 3, О-Р.-608 с. Том – 4, С -Я, - 1024 с.
5. Богорош О. Т., Воронов О. С., Шайко-Шайковський О.Г., Деревянчук О.В. Термо-томографія. Навчальний посібник для студентів ВНЗ НТУУ КПІ, Чернівецький національний університет Чернівці, 2016, 60 с

6. Богорош О.Т., Воронов С.О., Крамар В.М., Шайко-Шайковський О.Г., Марченко К.В. Наноматеріали і матеріали з унікальними властивостями, ч.3. // Навчальний посібник для студентів ВНЗ НТУУ КПІ, Чернівецький національний університет, 2016, - 264 с

Статті та тези доповідей

1. Aleksey M. Genkin, Vera K. Genkina, and Svetlana M. Zubkova / Radiation polarization of silicon carbide p-n-structures, operating in electrical breakdown regime // Eur. Phys. J. Appl. Phys. (2015) 70: 20103

(<http://www.epjap.org/articles/epjap/abs/2015/05/ap140205/ap140205.html>)

2. Voronov S.O., Genkin O.M., Genkina V.K., Rodionov V.M. / Calibrating LED source subnanosecond pulses of broadband optical radiation // 2016 IEEE International Scientific Conference of Information – telecommunication Technologies and Radioelectronics (UkrMiCo'2016). Proceedings, p. 192-197. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=7696809>

3. Богорош А.Т. / ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА В НАНОТЕХНОЛОГИЯХ // Сб. «Исследования в области прикладных наук – 2016», Изд. ИПИ, «Новые поступления», 27.01.2016, Израиль

http://ipi-science.net/articles_new.aspx

<http://ipi-science.net>

4. Bogorosh, A., Voronov, S., Višniakov, N., Ščekaturoviene, D.

The mechanism of defects formation in silicon substrates. Solid State Phenomena, Volume 165, 2015, P. 7-12

<https://www.scientific.net/SSP.165.7>

5. Воронов С.О., Генкін О.М., Генкіна В.К., Родіонов В.М. Стабільні формувачі імпульсного струму для живлення світлодіодів. Вісник НТУУ «КПІ» сер. «Приладобудування», 2016, вип.52(2), с. 59 - 65

6. Братусь В.Я., Коломис О.Ф., Мельник Р.С., Стрельчук В.В, Родионов В.Н. Фотолюминесценция нейтронно-облученного кубического карбида кремния. УФЖ, т.72, 2017

7. Воронов С.О., Генкін О.М., Генкіна В.К., Родіонов В.М. Термоанемометрія на основі полікристалічного карбиду кремнію кубічної модифікації. Вісник НТУУ «КПІ» сер. «Приладобудування», 2016, вип.52(2), с. 42 – 47

8. Богорош А.Т./ Лавины дислокаций и выбросы напряжения в платах радиоинженерного оборудования // Журнал «Приборы и методы измерений» Выпуск №1 (6)/2016. – С.7-12.

9. Bogorosh A, Visniakov N., Novickij., Bubulis A./ The mechanism of defects formation in silicon substrates./ Dislocation avalanches and strain strain bursts in the boards of radio-engineering equipment // The methods of measuring, control and diagnostics, №1/7. 2016. – С.79 – 85.

Vilnius Gediminas Teshnical University, Litviania

10. Bogorosh A., Visniakov N., Novickij., Bubulis A./ The mechanism of defects formation in silicon substrates./ Dislocation avalanches and strain strain bursts in the boards of radio-engineering equipment // The methods of measuring, control and diagnostics, №1/7. 2016. – С.79 – 85. Vilnius Gediminas Teshnical University, Litviania

11. S. Voronov; O. Genkin; V. Genkina; Rodionov V.M. R. Romaniuk; P. Kisała; J. Klimek; N. Askarova; S. Luganskaya;
Reference LED source of Subnanosecond pulses of broadband optical radiation
Proceedings Volume 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017; Wilga, Poland
1044510 (2017); doi: 10.1117/12.2281016
12. D. Savchenko, E. Kalabukhova, V. Rodionov, A. Prokhorov, V. Uzhva ESR and photoconductivity studies in n- and p-type polycrystalline 3CSiC Jaszowiec International School and Conference on the Physics of Semiconductors. Krynica-Zdroj, Poland, May, 2016. <http://www.jaszowiec.edu.pl/>
13. Воронов С.О., Генкин О.М., Генкина В.К., Родіонов В.М. Випромінювач на основі карбиду кремнію з малим розміром зони світіння. 14 Міжнародна наук-техн. конф. «Приладобудування: Стан і перспективи», зб. Тез доповідей, Київ 2015, с.51
14. Воронов С.О., Генкин О.М., Генкина В.К., Родіонов В.М. Стабільні формувачі імпульсного струму для живлення напівпровідникових джерел оптичного випромінювання, працюючих у режимі електричного пробою. 14 Міжнародна наук-техн. конф. «Приладобудування: Стан і перспективи», зб. Тез доповідей, Київ 2015, с.52
15. Братусь В.Я., Коломис О.Ф., Мельник Р.С., Родіонов В.М., Стрельчук В.В. Опромінений нейтронами кубічний SiC як потенційний матеріал для фотовольтаїки. 4 Міжнародна наук-практ. конф. «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» зб. Тез доповідей, Кременчук 2016, с. 62- 63
16. Воронов С.О., Генкин О.М., Генкина В.К., Родіонов В.М. Використання випромінюючих $p-n$ -структур на основі карбиду кремнію, працюючих у режимі електричного пробою для оцінки параметрів систем фотоз'йомки мікрооб'єктів. 15 Міжнародна наук-техн. конф. «Приладобудування: Стан і перспективи», зб. Тез доповідей, Київ 2016, с.37
17. Воронов С.О., Генкин О.М., Генкина В.К., Родіонов В.М. Термоанемометр на основі полікристаллического карбиди кремнію. 15 Міжнародна наук-техн. конф. «Приладобудування: Стан і перспективи», зб. Тез доповідей, Київ 2016, с.88

13. Ключові слова до розробки: Нанорозмірна надструктура, мікроплазми, електричний пробій, спектральні характеристики, карбід кремнію, оптично-електронні прилади.