

С. В. Луньов<sup>1</sup>, А. І. Зіміч<sup>1</sup>, П. Ф. Назарчук<sup>1</sup>, С. А. Мороз<sup>1</sup>,  
Л. М. Поліщук<sup>1</sup>, В. Т. Маслюк<sup>2</sup>, І. Г. Мегела<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Луцький національний технічний університет, Луцьк  
<sup>2</sup> Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород

### ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ АКТИВАЦІЇ А-ЦЕНТРА В ОДНОВІСНО ДЕФОРМОВАНИХ МОНОКРИСТАЛАХ n-Ge

На основі розв'язків рівняння електронейтральності та експериментальних результатів вимірювань п'єзо-холл-ефекту отримано залежності енергії активації глибокого рівня А-центра від одновісного тиску вздовж кристалографічних напрямків [100], [110] та [111] для монокристалів n-Ge, опромінених електронами з енергією 10 МеВ. За допомогою методу найменших квадратів отримано апроксимаційні поліноми для розрахунку даних залежностей. Показано, що енергія активації А-центра зменшується лінійно для всього діапазону одновісних тисків уздовж кристалографічного напрямку [100]. Для випадків одновісної деформації вздовж кристалографічних напрямків [110] та [111] зменшення енергії активації за лінійним законом спостерігається лише при високих одновісних тисках, коли глибокий рівень А-центра взаємодіє з тими мінімумами зони провідності германію, які виявилися нижніми при деформації.

*Ключові слова:* монокристали n-Ge, одновісна деформація, п'єзо-холл-ефект, радіаційні дефекти, А-центри.

С. В. Лунев<sup>1</sup>, А. И. Зимич<sup>1</sup>, П. Ф. Назарчук<sup>1</sup>,  
С. А. Мороз<sup>1</sup>, Л. Н. Полищук<sup>1</sup>, В. Т. Маслюк<sup>2</sup>, И. Г. Мегела<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Луцкий национальный технический университет, Луцк  
<sup>2</sup> Институт электронной физики НАН Украины, Ужгород

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ А-ЦЕНТРА В ОДНООСНО ДЕФОРМИРОВАННЫХ МОНОКРИСТАЛЛАХ n-Ge

На основе решений уравнения электронейтральности и экспериментальных результатов измерений пьезо-холл-эффекта получены зависимости энергии активации глубокого уровня А-центра от одноосного давления вдоль кристаллографических направлений [100], [110] и [111] для монокристаллов n-Ge, облученных электронами с энергией 10 МэВ. С помощью метода наименьших квадратов получены аппроксимационные полиномы для расчета данных зависимостей. Показано, что энергия активации глубокого уровня А-центра уменьшается линейно для всего диапазона одноосных давлений вдоль кристаллографического направления [100]. Для случаев одноосной деформации вдоль кристаллографических направлений [110] и [111] уменьшение энергии активации по линейному закону наблюдается только при высоких одноосных давлениях, когда глубокий уровень А-центра взаимодействует с теми минимумами зоны проводимости германия, которые оказались нижними при деформации. Различные зависимости энергии активации А-центра от ориентации оси деформации могут быть связаны с особенностями его микроструктуры.

*Ключевые слова:* монокристаллы n-Ge, одноосная деформация, пьезо-холл-эффект, радиационные дефекты, А-центры.

S. V. Luniov<sup>1</sup>, A. I. Zimych<sup>1</sup>, P. F. Nazarchuk<sup>1</sup>, S. A. Moroz<sup>1</sup>, L. N. Polishchuk<sup>1</sup>, V. T. Maslyuk<sup>2</sup>, I. G. Megela<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lutsk National Technical University, Lutsk  
<sup>2</sup> Institute of Electron Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Uzhhorod

### DETERMINATION OF THE ACTIVATION ENERGY OF A-CENTER IN THE UNIAXIALLY DEFORMED n-Ge SINGLE CRYSTALS

Based on the decisions of electroneutrality equation and experimental results of measurements of the piezo-Hall-effect the dependences of activation energy of the deep level A-center depending on the uniaxial pressure along the crystallographic directions [100], [110] and [111] for n-Ge single crystals, irradiated by the electrons with energy 10 MeV are obtained. Using the method of least squares approximations polynomials for the calculation of these dependences are obtained. It is shown that the activation energy of A-center deep level decreases linearly for the entire range of uniaxial pressure along the crystallographic direction [100]. For the cases of uniaxial deformation along the crystallographic directions [110] and [111] decrease of the activation energy according to the linear law is observed only at high uniaxial pressures, when the A-center deep level interacts with the minima of the germanium conduction band, which proved the lower at the deformation. The various dependences of the activation energy of A-center depending on the orientation of the axis of deformation may be connected with features of its microstructure.

*Keywords:* n-Ge single crystals, uniaxial deformation, piezo-Hall-effect, radiation defects, A-centers.

## REFERENCES

1. Issues of radiation technology of semiconductors / Ed. L. S. Smirnova - Novosibirsk: Nauka, 1980. - 296 p. (Rus)
2. *Kozlovskij V. V., Kozlov V. A., Lomasov V.N.* // *FTP*. - 2000. - Vol. 34, Iss. 2. - P. 129 - 147. (Rus)
3. *Semenyuk A.K.* Radiation effects in multi-valves semiconductors. - Luts'k: Nadstyr'ya, 2001. - 323 p. (Ukr)
4. *Claes C., Simoen E.* *Germanium-Based Technologies: From Materials to Devices*. - Oxford: Elsevier Science, 2007. - 476 p.
5. *Murphy-Armando F., Fahy S.* Giant enhancement of n-type carrier mobility in highly strained germanium nanostructures/ancement of n-type carrier mobility in highly strained germanium nanostructures // *J. Appl. Phys.* - 2011. - Vol. 109. - P. 113703.
6. *Lemke B., Baskaran R., Paul O.* Piezoresistive CMOS sensor for out-of-plane normal stress // *Sensor Actuat A-phys.* - 2012. - Vol. 176. - P. 10 - 18.
7. *Lobanov D.N., Novikov A.V., Kudryavtsev K.E. et al.* Effect of parameters of Ge(Si)/Si(001) self-assembled islands on their electroluminescence at room temperature // *Semiconductors*. - 2009. - Vol. 43, Iss. 3. - P. 313 - 317.
8. *Tong S., Liu J., Wan L. J. et al.* Normal-incidence Ge quantum-dot photodetectors at 1.5  $\mu\text{m}$  based on Si substrate // *Appl. Phys. Lett.* - 2002. - Vol. 80. - P. 1189.
9. *Brunner K.* Si/Ge nanostructures // *Rep. Prog. Phys.* - 2002. - Vol. 65, No. 1. - P. 27.
10. *Gaidar G.P.* On the tensorresistance of n-Ge and n-Si crystals with radiation-induced defects // *Semiconductors*. - 2015. - Vol. 49, Iss. 9. - P. 1129 - 1133.
11. *Luniov S.V., Zimych A.I., Nazarchuk P.F. et al.* Specific features of electron scattering in uniaxially deformed n-Ge single crystals in the presence of radiation defects // *Radiation Effects and Defects in Solids*. - 2016. - Vol. 171, Iss. 11. - P. 855 - 868.
12. *Luniov S.V., Zimych A.I., Nazarchuk P.F. et al.* Determination of parameters of radiation defects in single crystal n-Ge irradiated by high-energy electrons // *Yaderna fizyka ta energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)*. - 2016. - Vol. 17, No. 1. - P. 47 - 52.
13. *Kireev P.S.* Physics of semiconductors. - Moskva: Vysshaya shkola, 1969. - 590 p. (Rus)
14. *Fage-Pedersen J., Larsen A.N., Mesli A.* Irradiation-induced defects in Ge studied by transient spectroscopies // *Phys. Rev. B*. - 2000. - Vol. 62, No. 15. - P. 10116 - 10125.
15. *Larsen A.N., Mesli A.* The hidden secrets of the E-center in Si and Ge // *Physica B*. - 2007. - Vol. 401-402. - P. 85 - 90.
16. *Markevich V.P., Peaker A.R., Litvinov V.V. et al.* Electronic properties of antimony-vacancy complex in Ge crystals // *J. Appl. Phys.* - 2004. - Vol. 95, Iss. 8. - P. 4078.
17. *Markevich V.P., Hawkins I.D., Peaker A.R. et al.* Vacancy-group-V-impurity atom pairs in Ge crystals doped with P, As, Sb, and Bi // *Phys. Rev. B*. - 2004. - Vol. 70, Iss. 23. - P. 235213.
18. *Petersen M. Christian, Larsen A. Nylandsted, Mesli A.* Divacancy defects in germanium studied using deep-level transient spectroscopy // *Phys. Rev. B*. - 2010. - Vol. 82. - P. 075203.
19. *Coutinho J., Torres V. J. B., Jones R. et al.* Calculation of deep carrier traps in a divacancy in germanium crystals // *Appl. Phys. Lett.* - 2006. - Vol. 88, Iss. 9. - P. 091919.
20. *Markevich V.P., Hawkins I.D., Peaker A.R. et al.* Electronic properties of vacancy-oxygen complex in Ge crystals // *Appl. Phys. Lett.* - 2002. - Vol. 81. - P. 1821.
21. *Litvinov V.V., Murin L.I., Lindstrom Dzh.L. et al.* // *FTP*. - 2002. - Vol. 36, Iss. 6. - P. 658. (Rus)
22. *Polyakova A.L.* Deformation of semiconductors and semiconductor devices. - Moskva: Nauka, 1979. - 168 p. (Rus)
23. *Baranskij P.I., Klochkov V.P., Potykevich I.V.* Semiconductor electronics. - Kyiv: Naukova Dumka, 1975. - 704 p. (Rus)
24. *Markevich V.P., Litvinov V.V., Dobaczewski L. et al.* Vacancy-oxygen complex in Ge crystals // *Physica B*. - 2003. - Vol. 340-342. - P. 844 - 848.
25. *Semenyuk A.K., Nazarchuk P.F.* // *FTP*. - 1984. - Vol. 18, Iss. 3. - P. 540 - 542. (Rus)
26. *Semenyuk A.K., Nazarchuk P.F.* // *FTP*. - 1985. - Vol. 19, Iss. 7. - P. 1331 - 1333. (Rus)

Надійшла 10.03.2017

Received 10.03.2017