



УДК 621.315.592.3

© 2010

П. І. Баранський, Г. П. Гайдар

Ізотропність розсіяння на флуктуаціях легуючої домішки в сильно легovanому n -кремнії

(Представлено членом-кореспондентом НАН України П. М. Томчуком)

Експериментально доведено, що в сильно легovanих монокристалах n -Si : As наявність градієнта температури на межі рідкої і твердої фаз у процесі їх вирошування з розплаву не приводить до прояву анізотропії у флуктуативному розподілі легуючої домішки. Цей факт демонструє домінуюче значення хаотизації у просторовому розподілі легуючої домішки за рахунок kT , що відбувається при $T = 1412$ °C у процесі вирошування легovanих монокристалів n -Si з розплаву.

Автор роботи [1], який вивчав п'єзоопір і п'єзохоллефект на сильно легovanих домішкою фосфору зразках n -Si, вперше звернув увагу на ефективне розсіяння носіїв заряду на флуктуаціях концентрації легуючої домішки. Цей результат згодом знайшов своє підтвердження в дослідях із сильно легovanими кристалами n -Si різними домішками донорного типу (P, Sb, As) за умов, коли п'єзоопір, завдяки міжмінімумному перерозподілу носіїв заряду в наведено-деформованих кристалах (при $J//X//\langle 001 \rangle$), проявляється найбільш виразно [2]. Виявилося, що ефект розсіяння носіїв заряду на флуктуаціях домішок проявляється не тільки за умов вимірів максимальних змін опору при проходженні електричного струму (J) вздовж осі деформації (тобто при $J//X//\langle 001 \rangle$), але також і за умов, коли електричний струм орієнтований перпендикулярно осі деформації, тобто при $J \perp X//\langle 001 \rangle$ [3].

У пружно-деформованих (в напрямку $\langle 111 \rangle$) і відносно слабо легovanих кристалах n -Si ($n_e \approx 10^{13} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$) автори робіт [4–7] виявили наявність деформаційних змін питомого опору, коли взагалі відсутній міжмінімумний перерозподіл носіїв заряду, а зміни питомого опору під впливом направлено тиску виникають у зв'язку з деформаційними змінами поперечної ефективної маси (m_{\perp}^*) і непараболічності зони провідності (s -зони), індукованої деформацією. У роботі [5] зверталася увага на ту обставину, що як теорія [8], так і дані щодо циклотронного резонансу в наведено-деформованому n -Si [4] показують, що

при наявності компоненти деформації зсуву (характерної для $X//\langle 111 \rangle$ в n -Si) m_{\perp}^* лінійно зростає з ростом X приблизно на 1% на кожні 0,25 ГПа.

Зважаючи на загальний вираз для рухливості у багатодолинному кристалі

$$\mu = \frac{e \langle \tau_{\perp} \rangle}{3 m_{\perp}^*} \left(2 + \frac{1}{K} \right) \approx \frac{2}{3} e \frac{\langle \tau_{\perp} \rangle}{m_{\perp}^*}, \quad (1)$$

де, згідно з [9],

$$\tau_{\perp} = \frac{a_{\perp}}{T \sqrt{\varepsilon}}, \quad a_{\perp} = \frac{\pi c'_{11} \hbar^4}{k C_1^2 \sqrt{2 m_{\parallel} m_{\perp}^2}} \frac{1}{\Phi_{1a}} = \frac{A}{m_{\perp}^*}, \quad (2)$$

A — постійна, оскільки функція Φ_{1a} дуже слабо залежить від m_{\parallel}^* і m_{\perp}^* , стає очевидним безпосередній зв'язок досить екзотичного п'єзоопору в n -Si (при $J//X//\langle 111 \rangle$) з рухливістю носіїв заряду, як показує зіставлення (1) з (2), що приводить до

$$\mu \sim \frac{1}{m_{\perp}^{*2}}. \quad (3)$$

Отже, п'єзоопір при $J//X//\langle 111 \rangle$ (тобто, без міжмінімумного перерозподілу носіїв заряду) виникає за рахунок лише зниження рухливості μ при повністю незмінній концентрації носіїв $n_e = \text{const}$ у c -зоні. Але при досить високій концентрації легуючої домішки в n -Si, що супроводжується появою “хвостів” у густині станів, і деформуванні його в напрямку $X//\langle 111 \rangle$ може з'являтися й інша причина виникнення такого п'єзоопору, пов'язана зі зміною n_e в c -зоні. Дійсно, в роботі [10] показано, що за умов деформування n -Si в напрямку $\langle 111 \rangle$ енергетична щілина ΔE_d (між дном c -зони і рівнем домішок) зі зростанням X не зменшується (як це відбувається при $X//\langle 001 \rangle$ і $X//\langle 110 \rangle$), а зростає. І за умов неповної іонізації домішкових центрів це буде приводити (при $T = \text{const}$) до зростання п'єзоопору за рахунок деформаційного “виморожування” носіїв заряду із c -зони.

За відсутності виродження електронного газу, але при досить сильному легуванні n -Si (до $\rho \approx 0,02$ Ом · см) і за умов $J//X//\langle 111 \rangle$ усе вищесказане забезпечує в обмеженій області $X \leq 0,6$ ГПа (як показано в [10]) зовсім не характерний для механізму п'єзоопору, пов'язаного з міжмінімумним перерозподілом носіїв заряду, знак нерівності, а саме:

$$\frac{\rho_X^{(111)}}{\rho_0} (300 \text{ K}) > \frac{\rho_X^{(111)}}{\rho_0} (77 \text{ K}). \quad (4)$$

І лише при подальшому підвищенні $X > (0,6 \div 0,7)$ ГПа внаслідок розглянутого ефекту деформаційного “виморожування” носіїв із c -зони нерівність (4) змінює знак на протилежний.

Встановивши причини появи п'єзоопору при симетричному розміщенні осі деформації відносно ізоенергетичних еліпсоїдів, у попередніх роботах з n -Si не було отримано відповіді на те, чи може наявність градієнта температури на межі твердої і рідкої фаз (при вирощуванні монокристала) і кристалізаційне відтиснення домішки в ділянки зливка, що кристалізуються в останню чергу, сприяти появі анізотропії у флуктуаційному розподілі легуючих домішок. Оскільки впливу названих вище факторів може істотно протидіяти енергія теплового руху (kT), тим більше, що температура плавлення кристалів кремнію

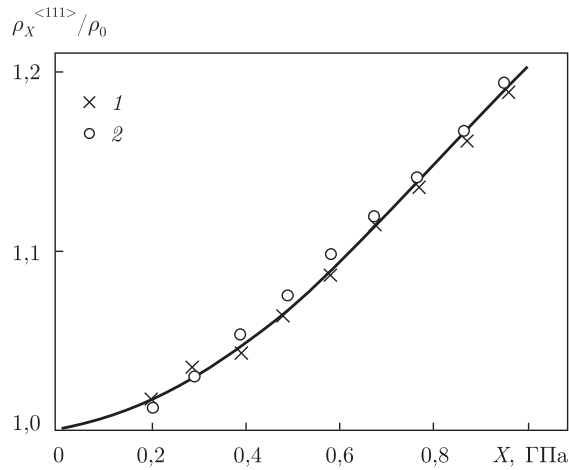


Рис. 1. П'єзоопір сильно легovanого n -Si : As при $T = 4,2$ К: 1 – $J//X//\langle 111 \rangle$; 2 – $J \perp X//\langle 111 \rangle$

досить висока ($T_{\text{плав}} \sim 1412$ °C), то відповідь на питання про наявність (чи відсутність) деякої анізотропії у флуктуаційному розподілі домішки міг дати лише експеримент, якому і присвячена дана робота.

Було використано n -Si : As з $\rho_{300\text{ К}} \approx 0,43 \cdot 10^{-2}$ Ом·см, вирощений у кристалографічному напрямку $\langle 111 \rangle$ з розплаву. Зразки вирізалися в цьому ж напрямку з точністю виведення орієнтації не гірше $15'$. Виміри п'єзоопору проводилися при 4,2 К при пропусканні струму як вздовж деформуючого навантаження X ($J//X//\langle 111 \rangle$), так і перпендикулярно до нього ($J \perp X//\langle 111 \rangle$). Типові результати, що були одержані, наведено на рис. 1. Очевидно, що анізотропія електропровідності (а отже, і просторового розподілу флуктуативних скупчень легуючої домішки) відсутня. Цей висновок (в межах досягнутої точності експерименту) можна вважати надійним, оскільки виміри $\rho_X^{\langle 111 \rangle}/\rho_0$ проводилися при пропусканні J в тих напрямках (відносно напрямку вирощування кристала), в яких ефект анізотропії (за його наявності) мав би проявитися максимально виразно.

1. *Kinoshita J.* Piezoresistance and piezo-hall effect in heavily doped n -type silicon // *J. Phys. Soc. Japan.* – 1972. – **33**, No 3. – P. 743–746.
2. *Баранский П. И., Коломоец В. В., Охрименко Ю. А.* Пьезосопротивление и эффект Холла сильно легированных кристаллов n -Si // *Физика и техника полупроводников.* – 1985. – **19**, № 10. – С. 1768–1770.
3. *Баранский П. И., Коломоец В. В., Охрименко Ю. А.* Пьезосопротивление вырожденных кристаллов n -Si вдоль и поперек оси деформации // Там же. – 1985. – **19**, № 8. – С. 1411–1413.
4. *Hensel J. C., Hasegawa H., Nakayama M.* Cyclotron Resonance in Uniaxially Stressed Silicon. II. Nature of the Covalent Bond // *Phys. Rev.* – 1965. – **138**. – P. A225-A238.
5. *Баранский П. И., Коломоец В. В., Федосов А. В.* Пьезосопротивление, возникающее в условиях симметричного расположения оси деформации относительно всех изоэнергетических эллипсоидов в n -Si // *Физика и техника полупроводников.* – 1979. – **13**, № 4. – С. 815–819.
6. *Baranskii P. I., Kolomoets V. V., Korolyuk S. S.* The Non-Parabolicity of the n -Si Conduction Band Caused by Elastic Deformation along the $\langle 111 \rangle$ Direction // *Phys. stat. sol. (b).* – 1983. – **116**. – P. K109-K112.
7. *Tufte O. N., Stelzer E. L.* Piezoresistive properties of heavily doped n -type silicon // *Phys. Rev.* – 1964. – **133**, No 6A. – P. A1705-A1716.
8. *Бир Г. Л., Пикус Г. Е.* Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. – Москва: Наука, 1972. – 587 с.

9. *Электрические и гальваномагнитные явления в анизотропных полупроводниках* / Под ред. П. И. Баранского. – Киев: Наук. думка, 1977. – 270 с.
10. *Баранский П. И., Коломоец В. В., Охрименко Ю. А., Федосов А. В.* Влияние одноосной упругой деформации на энергию ионизации примеси фосфора в кристаллах кремния // *Физика и техника полупроводников*. – 1982. – **16**, № 2. – С. 361–364.

*Институт фізики напівпровідників
ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, Київ,
Институт ядерних досліджень НАН України, Київ*

Надійшло до редакції 08.04.2010

P. I. Baranskii, G. P. Gaidar

Isotropy of scattering on fluctuations of doping impurities in heavily doped *n*-silicon

*It is experimentally proved that the presence of the temperature gradient (at the interface of the liquid and solid phases in heavily doped monocrystals of *n*-Si : As in the process of their growth from a melt) does not lead to an anisotropy in the fluctuating distribution of a doping impurity. This fact shows the dominating role of randomization in the spatial distribution of a doping impurity due to kT (at $T = 1412$ °C) during the growth of *n*-Si doped monocrystals from a melt.*