

РОЗДІЛ I

Фізика твердого тіла

УДК 621.315.592

Л. І. Панасюк – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики і електротехніки Луцького національного технічного університету;
В. В. Коломоєць – професор, доктор фізико-математичних наук, провідний науковий співробітник Інституту фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова НАНУ;
В. В. Божко – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики твердого тіла Волинського національного університету імені Лесі Українки

Про домінуючу роль f-переходів у міждолинному розсіюванні в n-Si при температурі $T = 300\text{--}450\text{ K}$

Роботу виконано в Інституті фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України

З метою в'ясування ролі f- та g-переходів у міждолинному розсіюванні в кремнії n-типу в області температур 300–450 K було використано тензорезистивний (ТР) ефект, пов'язаний з міждолинним переселенням носіїв струму при одновісній деформації $\vec{X} // [001]$ n-Si ($n_e = 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$), а також температурні залежності питомого опору $\rho = \rho(T)$ в одновісно деформованих і недеформованих кристалах. Як і раніше під час вимірювань ТР ефекту при температурі $T < 300\text{ K}$, спостерігається нахил залежності $\log \rho$ від $\log T$, який за відсутності тиску відповідає степеневому закону зміни рухливості $\mu \sim T^{-2,3}$, а при сильних одновісних тисках $X = 12000 \text{ кГ/см}^2$ ($\Delta\varepsilon > 10kT$) – $\mu \sim T^{-1,6}$. При такому тиску повністю знімаються f-переходи з міждолинного розсіювання, тому суттєва зміна нахилу температурної залежності питомого опору в цьому інтервалі температур при переході від недеформованих кристалів кремнію до одновісно деформованих кристалів свідчить про наявність вирішального внеску f-переходів у міждолинне розсіювання при $X = 0$.

Ключові слова: тензорезистивний ефект, міждолинне розсіювання, питомий опір, рухливість.

Панасюк Л. І., Коломоєць В. В., Божко В. В. Определяющая роль f-переходов в междолинном рассеянии n-Si в области температур $T = 300\text{--}450\text{ K}$. С целью выяснения роли f- та g-переходов в междолинном рассеянии в кремнии n-типа в области температур 300–450 K был использован тензорезистивный (ТР) эффект, связанный с межминимумным переселением носителей тока при одноосной деформации $\vec{X} // [001]$ n-Si ($n_e = 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$), и температурные зависимости удельного сопротивления $\rho = \rho(T)$ для одноосно деформированных и недеформированных кристаллов. Как и раньше при измерениях ТР эффекта в области температур $T < 300\text{ K}$, наблюдается наклон зависимости $\log \rho$ от $\log T$, который при отсутствии деформации соответствует степенному закону изменения подвижности $\mu \sim T^{-2,3}$, а при сильных одноосных деформациях $X = 12000 \text{ кГ/см}^2$ ($\Delta\varepsilon > 10kT$) – $\mu \sim T^{-1,6}$. При таких механических напряжениях одноосного сжатия полностью исключаются f-переходы с междолинного рассеяния, поэтому существенное изменение наклона температурной зависимости удельного сопротивления в интервале 300 – 450 K при переходе от недеформированных кристаллов кремния к одноосно деформированным, свидетельствует об определяющей роли f-переходов в междолинном рассеянии при $X = 0$.

Ключевые слова: тензорезистивный эффект, междолинное рассеяние, удельное сопротивление, подвижность.

Panasjuk. L. I., Kolomojcz V. V., Bozhko V. V. The Dominant Role of f- and g-transitions in Intervalley Dissipation of n-type Silicon in the Temperature Range of $T = 300\text{--}450\text{ K}$. In order to elucidate a role of f- and g-transitions in intervalley dissipation of n-type silicon in the temperature range of 300–450 K, we have measured the tensorresistive (TR) effect caused by intervalley transfer of charge carriers at one-axis deformation $\vec{X} // [001]$ n-Si ($n_e = 4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$), as well as temperature dependencies of specific resistance $\rho = \rho(T)$ in one-axis deformed and undeformed crystals. As in the previous measurements of TR effect at temperatures $T < 300\text{ K}$, we have observed a slope of dependency of $\log \rho$ upon $\log T$, which corresponds, in the case of absence of pressure, to the degree rule of change of $\mu \sim T^{-2.3}$ mobility, but in the case of strong one-axis pressures $X = 12000 \text{ kG/cm}^2$ ($\Delta \epsilon > 10kT$) it corresponds to $\mu \sim T^{-1.6}$. At such pressure, the f-transitions caused by intervalley dissipation are absent. Therefore, significant change of a slope of temperature dependence of specific resistance in this temperature region when going from undeformed silicon crystals to the one-axis deformed crystal indicates the existence of principal contribution of f-transitions to intervalley dissipation at $X = 0$.

Key words: tensorresistive effect, intervalley dissipation, specific resistance, mobility.

Постановка наукової проблеми та її значення. Відомо, що в кремнії в актах розсіювання носіїв струму особливе місце належить міждолинним переходам (які дозволені правилами відбору в нульовому або першому наближенні з поглинанням або розсіюванням фонона з відповідною енергією та хвильовим вектором) електронів двох типів: g-переходи між долинами, розміщеними на одній і тій же осі, та f-переходи між долинами, розміщеними на взаємно перпендикулярних осях (рис. 1).

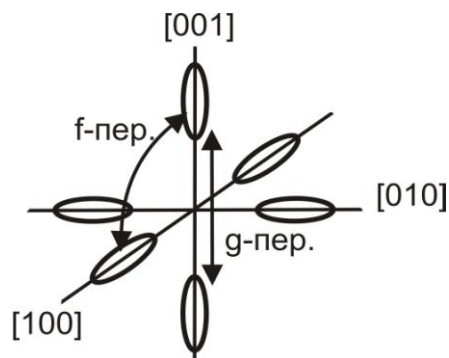


Рис. 1. Міждолинне розсіювання електронів в n-Si

Аналіз експериментальних та теоретичних даних багатьох робіт з вивчення f- та g-переходів у n-Si свідчить про те, що дискусія щодо їхньої ролі у міждолинному розсіюванні не закінчена до сьогодні. Це пов'язано з тим, що в кремнії існує досить великий набір фононів [5], які можуть вносити в тій чи іншій області температур майже порівняний внесок у міждолинні переходи електронів. Тому така обставина зобов'язує дослідників розширювати діапазон температурних областей.

Так, у роботі «Міждолинне розсіювання в n-Si в температурному інтервалі 78–300 K» [3] було показано вирішальну роль саме f-переходів, а також другорядну роль g-переходів у цій області температур. Автори зазначеної роботи зважали на те, що вклад f-переходів у міждолинне розсіювання в рівноважних умовах можна однозначно визначити при повному виключенні із процесів розсіювання цих переходів.

Вклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. З метою вияснення ролі f- та g-переходів у міждолинному розсіюванні в області температур 300–450 K було використано тензорезистивний ефект, пов'язаний з міждолинним переселенням носіїв струму при одновісній деформації $\vec{X} // [001]$ n-Si ($n_e = 4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$), а також температурні залежності питомого опору $\rho = \rho(T)$ в одновісно деформованих і недеформованих кристалах.

Теорія деформаційних ефектів [4] у напівпровідниках показує, що при одновісній деформації n-Si в напрямку $\vec{X} // [001]$ два еліпсоїди (перша група), розміщених на осі деформації, опускаються (по шкалі енергії), а чотири еліпсоїди (друга група) будуть підніматися. Внаслідок цього між еліпсоїдами обох груп виникає енергетична щілина. У результаті цього носії струму при досить великих тисках X повністю перейдуть із долин, які піднімаються по енергії, в долини, що

опускаються. Така ситуація характеризуватиметься відсутністю будь-яких проявів f-переходів, а отже і f-розсіювання, оскільки в мінімумах, які піднімаються по енергії за умови, коли енергетична щільність між мінімумами дорівнюватиме $\Delta\varepsilon > kT$, електрони будуть відсутні (рис. 2).

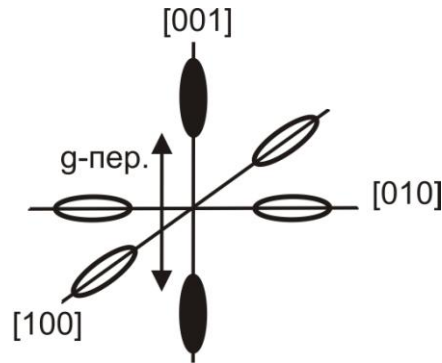


Рис. 2. Розсіювання електронів в n-Si при $\vec{X} // [001]$ та $X = 12000 \text{ кГ/см}^2$

У такому випадку характер температурної залежності питомого опору $\rho = \rho(T)$ в умовах повного виключення f-переходів буде свідчити про ефективність їх вкладу в міждолинне розсіювання.

На рисунку 3, взятому із роботи [3], у подвійному логарифмічному масштабі прямою 1 зображено залежність $\rho = \rho(T)$ для кристалів n-Ge. Ця пряма відповідає степеневому закону зміни рухливості $\mu \sim T^{-1,66}$, обумовленого внутрідолинним розсіюванням на акустичних коливаннях решітки. Майже до 100 K, згідно з цим законом, змінюється рухливість носіїв струму μ і в n-Si (крива 2 на ділянці А). Проте при більш високих температурах для температурної залежності питомого опору в недеформованих кристалах кремнію спостерігається наявність перегину цієї залежності, який визначає перехід від внутрідолинного розсіювання на акустичних коливаннях до розсіювання, пов'язаного з міждолинними переходами електронів. Цей перегин позначено на рисунку 3 вертикальною стрілкою. Ділянка Б кривої 2 характеризується залежністю $\rho = \rho(T)$, яка відповідає зміні рухливості згідно закону $\mu \sim T^{-2,3}$.

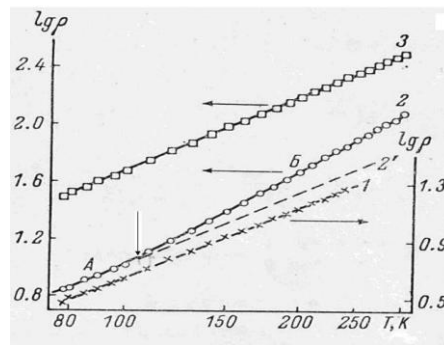


Рис. 3. Залежність $\rho = \rho(T)$ в подвійному логарифмічному масштабі [3]:

- 1 – для n-Ge при $X = 0 \text{ кГ/см}^2$ ($n_e = 9,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$);
- 2 – n-Si при $X = 0 \text{ кГ/см}^2$ ($n_e = 4,0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$);
- 3 – той же зразок n-Si при $X = 15\,000 \text{ кГ/см}^2$

Залежність $\rho = \rho(T)$ для одновісно деформованого n-Si при $\vec{X} // [001]$, $X = 15000 \text{ кГ/см}^2$ зображено на рисунку 3 кривою 3. У цьому випадку спостерігається відсутність перегину цієї залежності та суттєва зміна нахилу її в інтервалі температур $100 < T < 300 \text{ K}$ при переході від недеформованих кристалів n-Si (нахил 2,30 ділянка Б кривої 2) до одновісно деформованих (нахил 1,66 залежність 3). Це означає, що при виключенні за рахунок сильного одновісного тиску f-переходів (хоча g-переходи повністю не можна виключити) температурні залежності рухливості носіїв

струму в n-Si стають практично такими ж, як і в n-Ge. Оскільки при цьому усуненими являються лише f-переходи, то таке співпадання температурних залежностей рухливості кристалів кремнію і германію свідчить про вирішальну роль f-переходів у міждолинному розсіюванні в інтервалі температур 77–300 К.

Мета роботи полягала у з'ясуванні ролі f- та g-переходів у міждолинному розсіюванні в кремнії при температурі (300–450) К. Потрібно зауважити, що цей діапазон температур захоплює область власної провідності кристалів кремнію, тому всі висновки щодо впливу f- та g-переходів будуть обмежуватись значеннями температури, при якій починає проявлятися власна провідність.

Результати вимірювання тензорезистивного ефекту для кристалів n-Si в умовах $\vec{X} // J // [001]$ при різних температурах представлено на рисунку 4. Вигляд цих залежностей свідчить про те, що при одновісних тисках $X = 12\ 000\ \text{кГ/см}^2$ в області температур $T = (77\text{--}350)$ К повністю завершується перерозподіл носіїв струму між долинами і залежність $\rho_X/\rho_0 = f(X)$ виходить на насичення (криві 1–4). Зрозуміло, що насичення функції $\rho(X)$ характеризує відсутність прояву f-переходів.

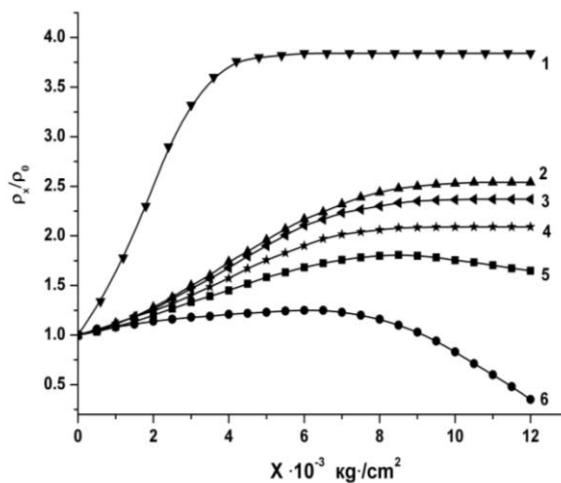


Рис. 4. Залежність $\rho_X/\rho_0 = f(X)$ n-Si ($n_e = 4 \cdot 10^{13}\ \text{см}^{-3}$) в умовах $\vec{X} // J // [001]$ при різних температурах T , К: 1) 77; 2) 300; 3) 320; 4) 350; 5) 400; 6) 450

Температурні залежності питомого опору недеформованих та стиснутих ($X = 12000\ \text{кГ/см}^2$) кристалів у напрямку [001] представлено відповідно на рисунках 5 та 6, в межах областей I яких можна переконатися у степеневому законі зміни рухливості $\mu \sim T^{-2,3}$ та $\mu \sim T^{-1,6}$. Обробка ж області II (рис. 5) в координатах $\log \rho = f(10^3/T)$ дала значення нахилу цих кривих $\sim 1,10\ \text{eV}$, що відповідає ширині забороненої зони недеформованого кремнію.

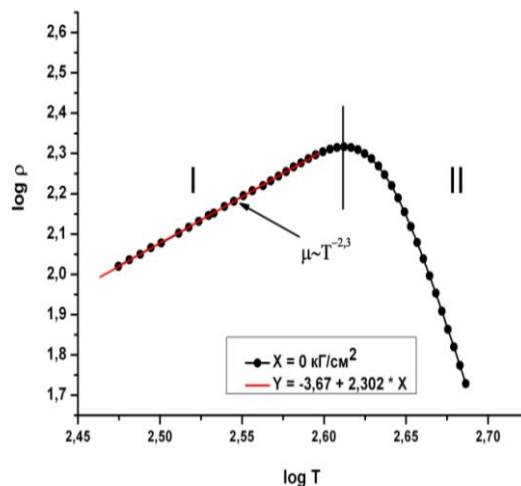


Рис. 5. Залежність $\rho = \rho(T)$ в подвійному логарифмічному масштабі для n-Si ($n_e = 4 \cdot 10^{13}\ \text{см}^{-3}$) при $X = 0\ \text{кГ/см}^2$

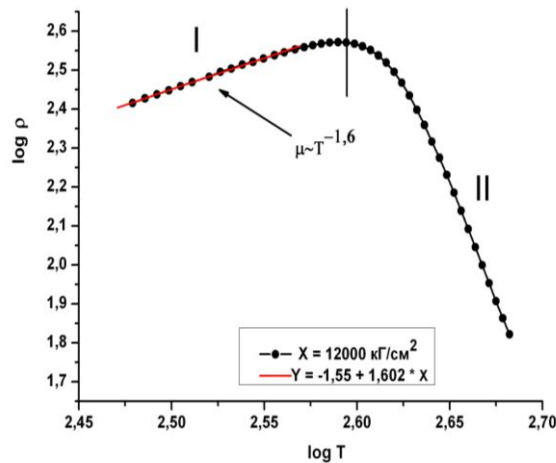


Рис. 6. Залежність $\rho = \rho(T)$ в подвійному логарифмічному масштабі для n-Si ($n_e = 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) при $X = 12000 \text{ κΓ/см}^2$

Отже, як показує порівняння законів зміни рухливості з температурою, для областей I при тиску $X = 12000 \text{ κΓ/см}^2$ і температурах 300–400 К повністю усуваються f-переходи з міждолинного розсіювання, що, в свою чергу, є свідченням їх вирішального внеску у цей тип розсіювання в недеформованих кристалах.

Правомірність зробленого висновку підтверджує кількісна оцінка отриманих результатів, проведена на основі даних теорії анізотропного розсіювання (ТАР) [2]. Загалом міждолинне розсіювання електронів на фонах описується скалярним часом релаксації. Але оскільки у всьому досліджуваному, і раніше (78–300 К), і зараз (300–450 К), інтервалі температур присутнє внутрідолинне розсіювання, необхідно проводити аналіз поведінки компонент тензора часів релаксації. Однак у нашому випадку можна обмежитися лише функціональною залежністю $\frac{1}{\tau_p} = f(x, T)$, оскільки достатнім є розгляд поздовжнього тензорезистивного ефекту. Отже, згідно з ТАР

$$\tau_{\parallel} = \frac{a_{11}}{\sqrt{kT^3} \sqrt{x + 2/3\varphi(x, T)}}$$

де $a_{11} = 3,09 \cdot 10^{-17} \text{ ерг}^{1/2} \cdot \text{К} \cdot \text{с}$, $x = \varepsilon/kT$ (ε – енергія електрона). Тут $\varphi(x, T)$ – громіздка функція [1], яка в цій роботі не наводиться і яка, як показує аналіз її поведінки, з ростом температури в усьому її діапазоні (78–450 К) плавно і слабо зростає, залишаючись нескінченно малою. Така ситуація реалізується лише за умови сильної деформації матеріалу (12000 κΓ/см²). Тому нехтуючи вкладом $\varphi(x, T)$ в усьому діапазоні температур, остаточно маємо:

$$\tau_{11} = \frac{a_{11}}{\sqrt{kT^3} \sqrt{x}}$$

тобто $\mu \sim T^{-3/2}$.

Уже очевидно, що послідовне і строге врахування значень функції $\varphi(x, T)$, які визначаються величинами $a = \frac{210}{T}$, $a = \frac{630}{T}$ (210 К і 630 К – характеристичні температури міждолинних фонів у кремнії), можливо дасть залежність $\mu \sim T^{-1,6}$. Але це стане предметом окремого дослідження.

Висновки. Отже, розширивши область температур аж до 450 К та використовуючи тензорезистивний ефект, пов'язаний з міждолинним переселенням носіїв струму при одновісній деформації $\vec{X} // [001]$, а також температурні залежності питомого опору $\rho = \rho(T)$ в одновісно деформованих і недеформованих кристалах n-Si, ми показали, що домінуюча роль у розсіянні носіїв струму в кремнії n-типу належить f-переходам в інтервалі температур, який ми досліджували.

Список використаної літератури

1. Аше М. Розсіювання електронів в n-Si / М. Аше та ін. // УФЖ. – 1970. – Т. 15. – № 10. – С. 1691–1698.
2. Баранский П. И. Электрические и гальваномагнитные явления в анизотропных полупроводниках / П. И. Баранский и др. - Киев : Наук. думка, 1977. - 270 с.
3. Баранский П. И. Междолинное рассеяния в n-Si в температурном интервале 78–300 К / П. И. Баранский и др. // ФТП. - 1976. - Т. 10. - Вып. 8. – С. 1480–1482.
4. Бир Г. Л. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках / Г. Л. Бир, Г. Е. Пикус. – М. : Наука, 1972. – 584 с.
5. Цыпленков В. В. Влияние одноосной деформации на релаксацию возбужденных состояний мелких доноров в кремнии при взаимодействии с междолинными фононами / В. В. Цыпленков, К. А. Ковалевский, В. Н. Шагин // ФТП. - 2009. - Т. 43. - № 11. – С. 1450–1455.

Статтю подано до редколегії
25.10.2011 р.