

ПРОВІДНІСТЬ КРИСТАЛІВ З НАДПРОВІДНИМИ НАНОРОЗМІРНИМИ ВКЛЮЧЕННЯМИ

В. Й. Сугаков, О. М. Шевцова

Вивчено вплив надпровідних включень, що знаходяться в діелектричній матриці, на електрофізичні властивості діелектрика. У припущенні, що радіус включення менший або порядку довжини когерентності, визначено критичне магнітне поле сферичного одиничного включення. Для кристала, що містить множини надпровідних включень, розраховано температурну залежність провідності, а також залежність провідності від магнітного поля. При розрахунках провідності використовувалось припущення, що концентрація включень є недостатньою для виникнення надпровідності у всьому зразку (тобто нижче порога протікання). Показано, що наявність надпровідних включень приводить до різкого збільшення провідності зразка при низьких температурах і до сильної залежності провідності від магнітного поля (магнітоопору). Магнітопровідність зумовлена подавленням надпровідності у включеннях з ростом магнітного поля. Вивчено вплив дисперсії розмірів включень на температурну й магнітопольову залежність провідності.

Поява металічних областей у ненадпровідному кристалі може бути зумовлена різноманітними технологічними процесами, серед яких слід виділити розпад твердих розчинів багатокомпонентних систем [1]. Якщо одна із компонент є надпровідним металом, то випадання даної речовини приведе до виникнення в кристалі надпровідних областей. Так, випадання надпровідної фази спостерігалось при термічній обробці телуриду свинцю - телуриду олова [2,3], а також при опроміненні InAs α -частинками [4].

Дослідження матеріалів, що містять надпровідні включення, є цікавим із точки зору вивчення феномена надпровідності в системах малих розмірів, а також з точки зору практичного застосування, оскільки в таких системах можливе виникнення різноманітних фізичних явищ, корисних для застосування.

У даній роботі буде показано, що навіть незначна кількість надпровідних включень у матеріалі може значно вплинути на електрофізичні та магнітні властивості кристалів при низьких температурах.

Першим кроком у дослідженні властивостей кристалів з надпровідними включеннями є побудова теорії, яка дасть змогу адекватно описати надпровідні властивості ізольованого включення. Випадок надпровідного включення сферичної форми, що знаходиться в діелектричній чи напівпровідниковій матриці, детально розглянуто в роботі [5].

Використаємо результати, отримані для ізольованого надпровідного включення, для визначення температурної залежності провідності, а також залежності провідності кристала, що містить надпровідні включення, від магнітного поля.

Розглянемо кристал, що містить включення сферичної форми, які можуть знаходитись у надпровідній фазі. Припустимо, що існує певне відхилення радіусів по розмірах. Для обчислення провідності використаємо метод ефективного середовища. Також будемо вважати, що загальний об'єм, який займають включення, менший від об'єму, який необхідний для появи протікання, і надпровідний струм через весь зразок відсутній. Тому при розрахунках будемо вважати, що залежно від температури та магнітного поля сферичне включення може бути в двох станах: надпровідному з провідністю, рівною нескінченності, або з опором, що відповідає матеріалу включення при даній температурі. Використовуючи формулу для обчислення провідності в багатокомпонентних системах [6]

$$\frac{\sigma_1 - \sigma}{\sigma_1 + 2\sigma} P_s + \frac{\sigma_2 - \sigma}{\sigma_2 + 2\sigma} P_n + \frac{\sigma_3 - \sigma}{\sigma_3 + 2\sigma} P_3 = 0, \quad (1)$$

де в даній задачі $\sigma_1 = \infty$ - провідність включення в надпровідному стані; σ_2 - провідність включення в нормальному стані; σ_3 - провідність матриці; $\sigma_2 > \sigma_3$; P_s та P_n - відносний об'єм включень у надпровідному та нормальному станах; $W(R)$ - ймовірність того, що в системі в одиничному інтервалі радіуса R знаходиться включення

$$P_s = P \frac{\int_0^{R_c(T, H)} R^3 W(R) dR}{\int_0^{\infty} R^3 W(R) dR}, \quad P_n = P - P_s, \quad P_3 = 1 - P, \quad (2)$$

де P - доля включень у зразку.

Кількісні розрахунки виконано у випадку нормального розподілу включень по радіусу $W(R)$ з дисперсією s та центром R_0 :

$$W(R) = Z \exp\left[-\frac{(R - R_0)^2}{2s^2}\right], \quad (3)$$

де Z визначається з умови нормування $\int_0^{\infty} W(R) dR = 1$.

Результати розрахунків залежності провідності від температури при різних магнітних полях для включень з різним значенням дисперсії представлені на рис. 1. Температурна залежність провідності характеризується різким стрибком у точці фазового переходу. При $H = 0$ цей стрибок дуже різкий (крива 1), оскільки в представленій моделі критична температура при відсутності магнітного поля не залежить від радіуса й температура фазового переходу однакова для всіх включень. Провідність системи визначається об'ємом надпровідних включень та провідністю матриці. Реально, що із-за можливого порушення внутрішньої структури включень малих розмірів критична температура фазового переходу включення T_c може залежати від радіуса й при відсутності магнітного поля.

При включенні магнітного поля критична температура надпровідних включень залежить від радіуса, тобто при даній температурі T ($T < T_c$) включення з $R \leq R_c(T, H)$ знаходяться в надпровідній фазі.

Форма $\sigma(H)$ визначається такими параметрами: долею включень P , провідністю включень у нормальній фазі, радіусом R_0 та дисперсією включень s . Загальним результатом, обумовленим присутністю включень, є поява залежності стрибка провідності $\sigma(H)$ при низьких температурах.

Аналіз температурної залежності провідності при різних магнітних полях для включень із різною дисперсією показує (див. рис. 1), що з ростом магнітного поля температурна область із збільшеною провідністю зменшується. При збільшенні дисперсії (s -сходінка стає більш пологою.

На рис. 2 наведено залежність провідності від магнітного поля. Видно, що при низьких полях спостерігається висока провідність, яка падає з ростом магнітного поля. У розглянутій випадку магнітоопір зумовлений подавленням надпровідності магнітним полем: спочатку у включеннях великих розмірів, а з ростом магнітного поля також і у включеннях малих розмірів. Це явище проілюстровано на рис. 3, де показано динаміку зміни фазового стану кристала із включеннями з ростом магнітного поля. Чорні кружечки відповідають надпровідним станам включень і їх число з ростом магнітного поля зменшується.

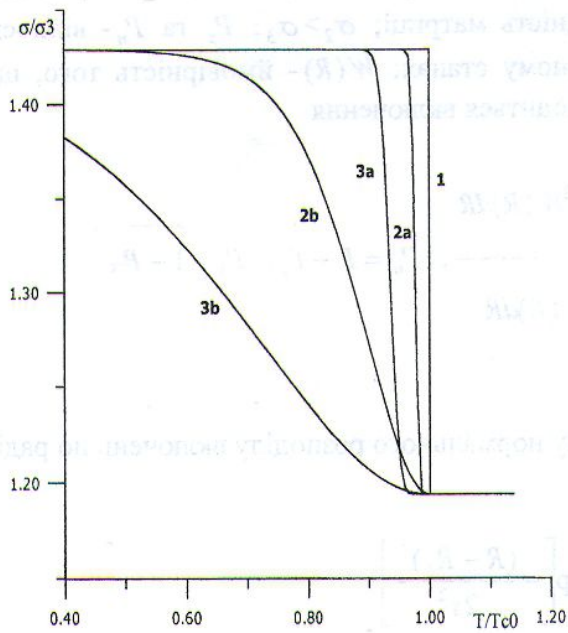


Рис. 1. Залежність провідності від температури: $P = 0,1$; $\sigma_2/\sigma_3 = 5$; $\kappa = 0,23$; $R_0 = 0,1$; $a - s = 0,01$; $b - s = 0,1$; $l - H = 0$; $2 - H = 1,5$; $3 - H = 2,5$.

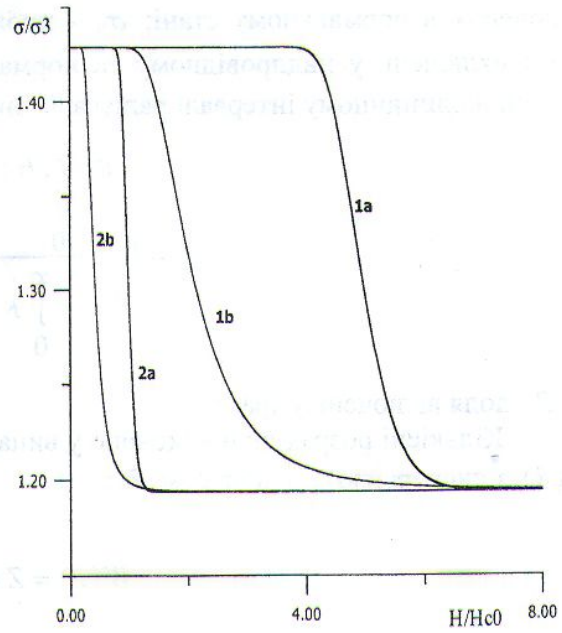


Рис. 2. Залежність провідності від магнітного поля при різних значеннях долі надпровідних включень: $a - s = 0,01$; $b - s = 0,1$; $P = 0,05$; $0,1$; $0,2$; $\sigma_2/\sigma_3 = 5$; $\kappa = 0,23$; $R_0 = 0,1$; $0,2$; $T = 0,99 T_c$.

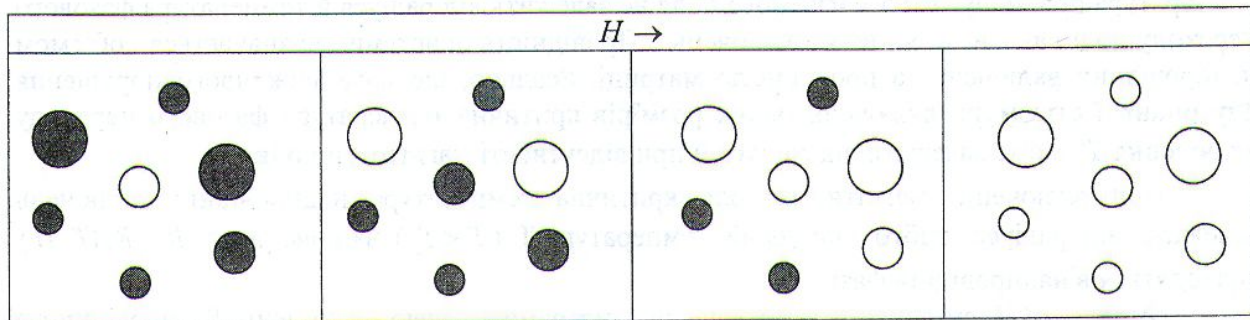


Рис. 3. Динаміка числа включень у надпровідному стані з ростом магнітного поля: $P = 0,15$; $T < T_c$. Темним кольором позначено включення в надпровідному, а білим – у нормальному станах.

Із рис. 1 та 2 видно, що область магнітних полів, при яких магнітопровідність спадає, зменшується з ростом радіуса включень, а величина області спаду визначається дисперсією. Таким чином, низькотемпературні залежності опору від поля та температури суттєво залежать від розмірів включень.

Із рис. 4 видно, що стрибок провідності збільшується з ростом P . Величина стрибка пропорційна P при малих значеннях P і стає нелінійною функцією P при наближенні до порога протікання. Висота стрибка (рис. 5) також зменшується з ростом σ_2 -провідності включень у нормальній фазі. Це пояснюється тим, що якщо провідність включення в нормальному стані є високою, то фазовий стан (надпровідний чи нормальний) не сильно впливає на загальну провідність зразка.

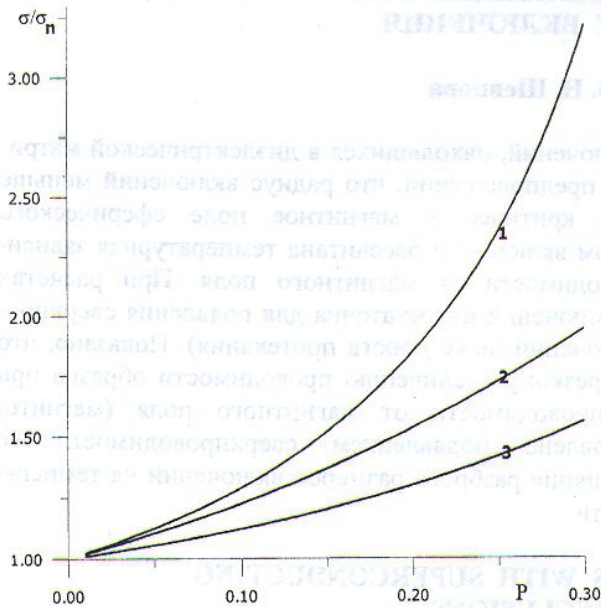


Рис. 4. Залежність провідності від доли над-
провідних включень: $\sigma_2 / \sigma_n = 5$; $\kappa = 0,23$;
 $R_0 = 0,1$; $H = 0,4$; $T = 0,99 T_c$.

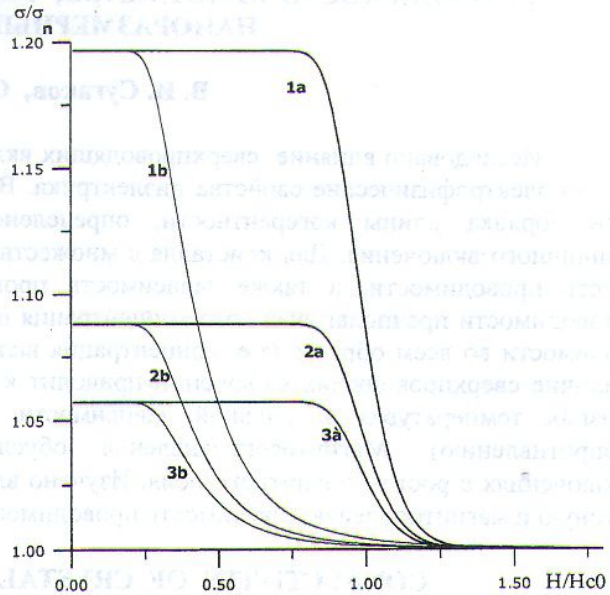


Рис. 5. Залежність провідності від магнітного
поля для різних значень провідності вклю-
чень у нормальному стані: $\sigma_2 / \sigma_n = 5$; 15;
25; $\kappa = 0,23$; $P = 0,1$; $R_0 = 0,1$; $T = 0,99 T_c$.
 $a - s = 0,01$; $b - s = 0,1$.

Таким чином, наявність надпровідних включень суттєво змінює електрофізичні властивості кристала. Провідність при низьких температурах зростає. Також при низьких температурах спостерігається сильна залежність провідності від магнітного поля, область магнітних полів, при яких провідність висока, росте із зменшенням розмірів включень. Залежність обумовлена фазовими переходами включень із надпровідного стану в нормальний з ростом магнітного поля. Усі перераховані ефекти сильно залежать від радіуса включень та його дисперсії. Тому вивчення температурної та магнітопольової залежності порівняно з експериментом дає можливість визначити дисперсію включень по радіусах.

Отримані результати можуть бути важливими для правильного опису електро-
провідності при низьких температурах у бінарних та більш складних напівпровідниках, в яких можливе випадання надпровідної фази при технологічній обробці або під дією зовнішнього впливу. Такі особливості електропровідності та магнітних властивостей спостерігались в PbTe, PbJ₂, InAs, GaAs [2 - 4, 7], де можливе випадання фаз, збагачених металами (Pb в PbTe і PbJ₂, In в InAs, Ga в GaAs).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мильвидский М.Г., Освенский В.Б. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников. – М: Металлургия, 1984.
2. Дедегкаев Т.Т., Мошников В.А., Чеснокова Д.Б., Яськов Д.А. // Письма в ЖТФ. – 1980. - Т. 6, вып. 17. - С. 1030 - 1033.
3. Дарчук С.Д., Дитл Т., Коровина Л.А. и др. // ФТП. – 1998. - Т. 32, № 7. - С. 786 - 789.
4. Вихлий Г.А., Карпенко А.Я., Литовченко П.Г. // УФЖ. – 1998. - Т. 43, № 1. - С. 103.
5. Sugakov V.I., Shevtsova O.N. // Supercond. Sci. Technol. - 2000. - Vol. 13, No. 10. - P. 1409 - 1414.
6. Springett B.E. // Phys. Rev. Lett. - 1973. - Vol. 31. - P. 1483.
7. Baranowski J.M., Liliental-Weber Z., Yau W.-F., Weber E.R. // Phys. Rev. Lett. - 1991. - Vol. 66, No. 23. - P. 3079.

**ПРОВОДИМОСТЬ КРИСТАЛЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ
НАНОРАЗМЕРНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ****В. И. Сугаков, О. Н. Шевцова**

Исследовано влияние сверхпроводящих включений, находящихся в диэлектрической матрице, на электрофизические свойства диэлектрика. В предположении, что радиус включений меньше или порядка длины когерентности, определено критическое магнитное поле сферического единичного включения. Для кристалла с множеством включений рассчитана температурная зависимость проводимости, а также зависимость проводимости от магнитного поля. При расчетах проводимости предполагалось, что концентрация включений недостаточна для появления сверхпроводимости во всем образце (т.е. концентрация включений ниже порога протекания). Показано, что наличие сверхпроводящих включений приводит к резкому увеличению проводимости образца при низких температурах и сильной зависимости проводимости от магнитного поля (магнитосопротивлению). Магнитосопротивление обусловлено подавлением сверхпроводимости во включениях с ростом магнитного поля. Изучено влияние разброса размеров включений на температурную и магнитополевую зависимость проводимости.

**CONDUCTIVITY OF CRYSTALS WITH SUPERCONDUCTING
NANOSCALE INCLUSIONS****V. I. Sugakov, O. N. Shevtsova**

A system of superconducting inclusions, which are immersed in a dielectric matrix has been studied. In the assumption that inclusion radius is less or order of coherence length a critical magnetic field of spherical isolated inclusion was determined. A temperature dependence of conductivity and conductivity as a function of magnetic field for a crystal with superconducting inclusions has been calculated. In the calculations the assumption was made that inclusion concentration is insufficient for onset of superconductivity in a whole sample (i.e. below threshold of percolation). It was shown that the presence of superconducting inclusions leads to the sharp increasing of conductivity of a sample at low temperatures, and to strong dependence of conductivity upon the magnetic field (magnetoresistance). Magnetoresistance is caused by superconductivity suppression in inclusions with increasing magnetic field. The influence of dispersion of inclusion sizes on the conductivity as a function of temperature and of magnetic field have been studied.

Надійшла до редакції 07.03.01