

Магнито­зависимое микроволновое поглощение в HgSe в слабых магнитных полях

© А.И. Вейнгер¹, Т.В. Тиснек¹, И.В. Кочман¹, В.И. Окулов²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

² Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, 620137 Екатеринбург, Россия

E-mail: Anatoly.Veinger@mail.ioffe.ru

(Получена 28 июня 2016 г. Принята к печати 3 июля 2016 г.)

Рассмотрен магниторезистивный эффект в полупроводнике HgSe:Fe в слабых магнитных полях на микроволновых частотах при низких температурах. Проанализированы отрицательная и положительная составляющие магнитопоглощения, основой которого является эффект магнитосопротивления в вырожденной зоне проводимости. Отмечены особенности экспериментов в этом диапазоне частот. Из анализа экспериментальных полевых и температурных зависимостей определены времена релаксации импульса и энергии электрона.

DOI: 10.21883/FTP.2017.02.44099.8362

1. Введение

Недавние исследования показали, что наряду с электронным парамагнитным резонансом (ЭПР) в проводящих кристаллах полупроводников наблюдается и нерезонансное изменение микроволнового поглощения в магнитном поле [1–4]. Анализ полевых и температурных зависимостей магнито­зависимого микроволнового поглощения (МП) позволяет получить важную и интересную информацию о параметрах полупроводников в том случае, когда в образцах наводятся диссипативные токи.

Основным эффектом, отвечающим за изменение МП в полупроводнике, является классический магниторезистивный эффект, в соответствии с которым удельное сопротивление полупроводника ρ увеличивается пропорционально квадрату приложенного магнитного поля H ,

$$\rho = \rho_0 + \beta H^2, \quad (1)$$

где β — коэффициент пропорциональности.

Теория предсказывает, что в вырожденных полупроводниках и металлах этот эффект в первом приближении должен исчезать и на его фоне должны проявляться более слабые эффекты: отрицательное магнитосопротивление (ОМС) и аномальное положительное магнитосопротивление, связанные с квантовыми поправками к проводимости [5,6]. Кроме этих эффектов в сильных полях в вырожденных полупроводниках возникают осцилляции магнитосопротивления (осцилляции Шубникова–де Гааза), которые наблюдаются в HgSe в магнитных полях $H > 4$ кЭ [7,8]. В настоящей работе они не будут рассматриваться.

Кроме магнитосопротивления причиной изменения микроволнового поглощения могут быть фазовые переходы, например исчезновение сверхпроводящей фазы в сильном магнитном поле [9], которое в ряде случаев позволяет обнаружить присутствие в образце сверхпроводящих фаз без использования омических контактов [10].

Настоящая работа посвящена исследованию эффекта МП в образцах HgSe, легированного Fe. Этот полупроводник интересен как материал для фундаментальных исследований благодаря своей необычной зонной структуре [11], так и для практического применения в спинтронике благодаря возможности легирования его большими концентрациями переходных металлов (Fe, Co, Ni, Mn), которое превращает этот материал в слабый ферромагнетик [12].

2. Методика эксперимента

Использование ЭПР-спектрометра для регистрации магниторезистивных эффектов в низкоомных полупроводниках имеет особенности, которые следует учитывать при проведении и интерпретации экспериментов. Эксперимент проводится следующим образом. Проводящий образец помещается в пучность микроволнового магнитного поля резонатора, в котором расположен тонкостенный криостат. Через него проходит охлаждающий газ или жидкость. Благодаря расположению проводящего образца в пучности магнитного поля он не искажает микроволновое поле, и резонатор сохраняет высокую добротность. Конструкция ЭПР-спектрометра такова, что в нем регистрируется не само поглощение микроволновой мощности P , а его производная по магнитному полю H : dP/dH . Это позволяет отделить МП от той части, которая не зависит от магнитного поля. Развертка магнитного поля осуществляется автоматически и управляется компьютером, что дает возможность воспроизводить магниторезистивные зависимости с высокой точностью.

В то же время использование микроволнового поля приводит к некоторым особенностям эффекта по сравнению с измерениями на постоянном токе. Эти особенности определяются скин-эффектом, в результате

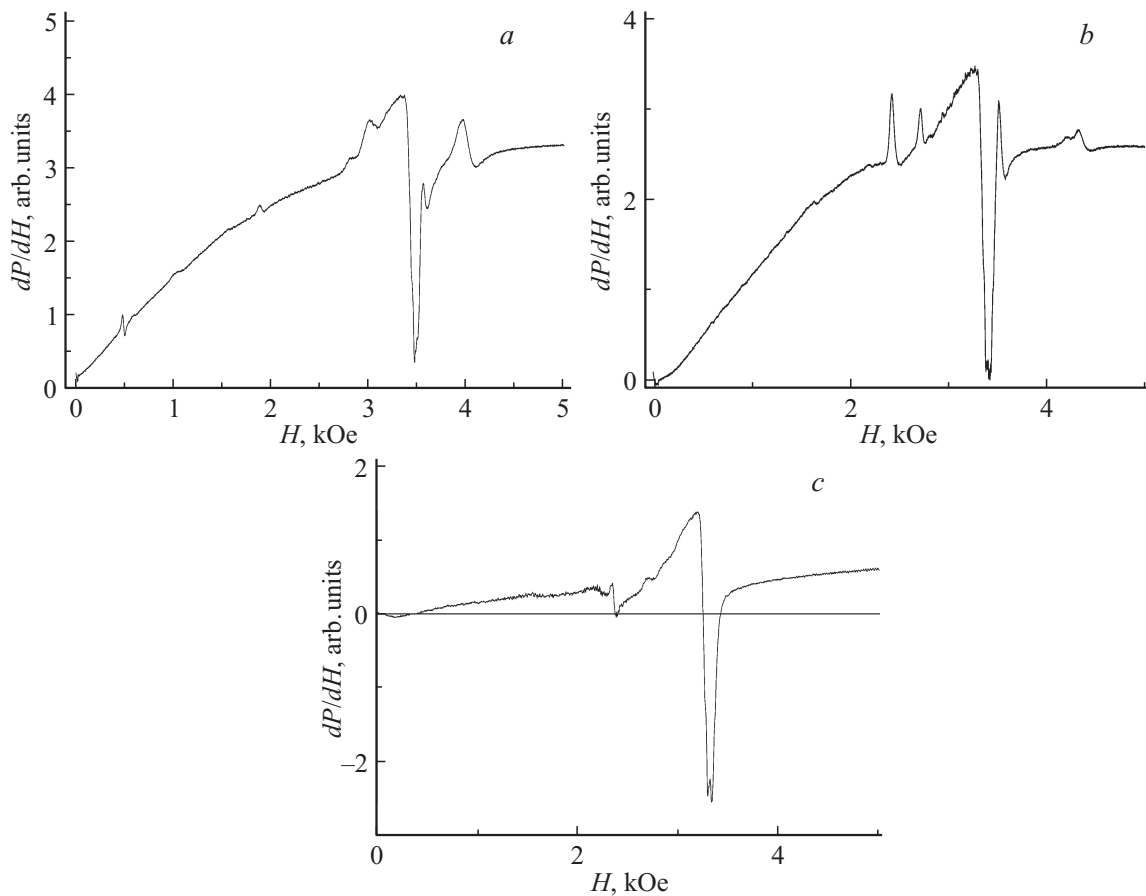


Рис. 1. Полевые зависимости производной микроволнового поглощения в образцах HgSe с различной концентрацией примеси Fe $N_{\text{Fe}}, \text{см}^{-3}$: *a* — $7 \cdot 10^{18}$ (образец А), *b* — $2 \cdot 10^{19}$ (образец В), *c* — $1 \cdot 10^{21}$ (образец С). Температура $T = 2.7 \text{ К}$.

которого микроволновое поле проникает только в приповерхностную область, и изменение МП определяется сопротивлением этой области. На поглощение в этом случае существенное влияние может оказывать состояние поверхности образца.

Проблема использования ЭПР-спектроскопии для подобных измерений состоит и в том, что при МП весьма непросто измерить абсолютное значение сопротивления образца. Считается, что точность при этом невысока ($\sim 20\%$) [13] и для измерения абсолютных значений сопротивления лучше использовать другие методы.

Для исследований мы использовали ЭПР-спектрометр E-112 фирмы „VARIAN“ с проточным гелиевым криостатом „Oxford Instruments ESR-910“, который способен поддерживать температуру образца с высокой точностью в широком диапазоне температур, $T = 2\text{--}300 \text{ К}$.

Измерения проводились на образцах HgSe, выращенных в Черновицком национальном университете (Украина). Они были легированы примесью железа, концентрация которого N_{Fe} варьировалась от 10^{18} до 10^{21} см^{-3} . Это соответствует изменению удельного сопротивления в диапазоне $(1\text{--}3) \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ [14]. Размеры образцов составляли $10 \times 2 \times 1 \text{ мм}$.

При таком удельном сопротивлении оценка глубины скин-слоя по стандартным формулам дает $\delta = (1.5\text{--}3) \cdot 10^{-3} \text{ см}$, т.е. $\sim 10 \text{ мкм}$. Таким образом, микроволновое поле целиком сосредоточено вблизи поверхности образца. Естественно, что наличие скин-слоя снижает чувствительность метода, но, как показывают результаты эксперимента, она остается достаточной для детектирования эффекта.

3. Экспериментальные результаты

На рис. 1 представлены полевые зависимости производной МП dP/dH для образцов HgSe с тремя различными концентрациями Fe. Значения концентраций указаны в подписи под рисунком. Из рисунка видно, что на плавное изменение производной накладываются узкие пики линий парамагнитного резонансного поглощения. Здесь мы ограничимся анализом МП, связанного с изменением сопротивления образца.

Из (1) следует, что амплитуда сигнала в слабых полях

$$dP/dH \approx dp/dH = \beta H, \quad (2)$$

т.е. растет линейно с полем. Действительно, из рис. 1 видно, что в слабых полях производная МП растет

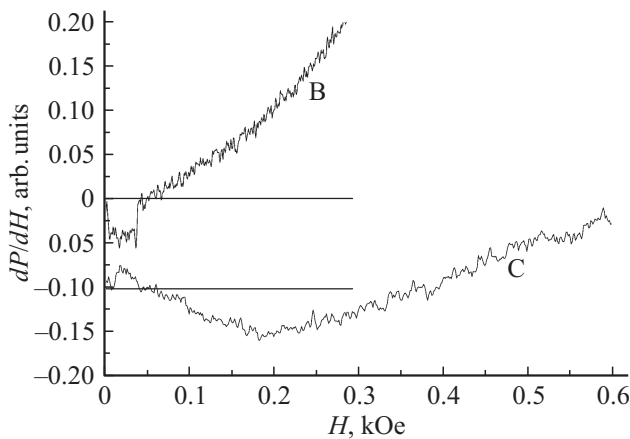


Рис. 2. Спектры микроволнового магнитопоглощения в полях $0 < H < 0.6$ кЭ образцов В и С в увеличенном масштабе. Зависимости сдвинуты по вертикали, для каждой отмечена своя нулевая линия.

пропорционально полю. Однако с ростом поля рост сигнала постепенно замедляется. Это особенно заметно в относительно слабо легированных образцах, где производная МП перестает зависеть от поля в области не слишком сильных полей. Переход от линейного участка производной к постоянному ее значению сдвигается в более сильные поля с ростом концентрации примеси, а в самом сильно легированном образце наблюдается только участок линейной зависимости производной МП от поля. Таким образом, из анализа рис. 1 можно заключить, что в слабых полях эксперимент соответствует формуле (1) и наблюдаемый эффект является проявлением классического магнитосопротивления.

В то же время в двух более легированных образцах видна особенность, заключающаяся в том, что в самых слабых полях производная магнитопоглощения является отрицательной. Это значит, что в этом образце проявляется ОМС, связанное с наличием квантовых поправок к проводимости. Участок спектра микроволнового магнитопоглощения, содержащий отрицательное МП, показан на рис. 2.

Нестандартное поведение МП в слабых полях наблюдается и в образце В. В нем ОМП исчезает скачком при увеличении магнитного поля.

4. Обсуждение результатов

Обсуждение результатов начнем с анализа эффекта отрицательного МП. Теория эффекта ОМС, которое вносит основной вклад в отрицательное МП, рассмотрена в [5] и подробно обсуждалась в [6]. Это явление носит название слабой локализации. В основе объяснения лежит теория квантовых поправок к проводимости. Она состоит в том, что для вычисления проводимости необходимо суммировать не все траектории электронов, а только те, которые не замкнуты. Замкнутые траекто-

рии необходимо исключить из суммирования, поскольку электроны могут их проходить в противоположных направлениях и в результате интерференции самоуничтожаться. Это равносильно уменьшению концентрации электронов в объеме полупроводника и увеличению ее на контактах.

При наложении на образец магнитного поля прохождение электронов по замкнутым траекториям в противоположных направлениях становится неэквивалентным и самоуничтожения таких траекторий в результате интерференции уже не происходит. Это равносильно увеличению концентрации электронов в объеме образца и, следовательно, уменьшению сопротивления. Такие траектории определяются временем сбоя фазы, т. е. электроны должны проходить по замкнутой траектории за время, меньшее времени сбоя фазы. Сбой фазы, как показано в [5,6], происходит за время порядка времени рассеяния энергии. Именно для таких траекторий справедливы рассуждения об интерференции. Для изменения условий интерференции необходимо приложить к образцу магнитное поле H_ϕ , которое называется полем сбоя фазы.

В работе [1] подробно рассмотрены свойства ОМС в вырожденных образцах InAs. Оказалось, что независимо от размерности образцов для микроволнового магнитопоглощения в слабых полях производная магнитопоглощения уменьшается с ростом поля, а в сильных полях увеличивается. Аналогичные зависимости наблюдаются и в образцах HgSe: как видно из рис. 2, при росте магнитного поля в области 0–200 Э производная микроволнового магнитного поглощения линейно уменьшается, а в более сильных полях растет. Характеристическое значение поля перехода от одной закономерности к другой определяется безразмерным параметром x :

$$x = 4DeH_\phi\tau_\phi/\hbar c \approx 1, \quad (3)$$

где D — коэффициент диффузии электронов, e — заряд электрона, τ_ϕ — характеристическое время сбоя фазы, которое по порядку величины соответствует времени рассеяния энергии.

Из (3) видно, что по величине поля сбоя фазы можно определить характерную длину диффузии за время сбоя фазы:

$$L_\phi = (D\tau_\phi)^{1/2} = \hbar c/4eH_\phi \approx 10^{-5} \text{ см}. \quad (4)$$

Интересно оценить время сбоя фазы в HgSe исходя из этого результата. Коэффициент диффузии D для этого материала неизвестен, но, судя по величине подвижности, он должен быть достаточно большим. Для оценки используем соотношение Эйнштейна, хотя его использование для вырожденных полупроводников не является вполне обоснованным:

$$D = \mu kT/e \approx 10^2 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}, \quad (5)$$

если принять, что подвижность $\mu \approx 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, а $kT/e \approx 1 \text{ мЭВ}$ (k — постоянная Больцмана) при гелиевых температурах. Из (4) получаем

$$\tau_\phi = L_\phi^2/D \approx 10^{-12} \text{ с}, \quad (6)$$

что должно быть существенно больше, чем время потери импульса.

Сравнение длины диффузии с глубиной скин-слоя показывает, что длина диффузии оказывается на 2 порядка меньше, чем глубина скин-слоя, и эффект ОМС можно рассматривать как трехмерный даже при концентрации железа $N_{\text{Fe}} \approx 10^{21} \text{ см}^{-3}$.

В заключение обсуждения особенностей отрицательного МП следует отметить, что помимо слабой локализации возможны квантовые поправки, обусловленные взаимодействием электронов. При этом рассматриваются два источника взаимодействия: за счет диффузии (взаимодействие в диффузионном канале) и за счет „сверхпроводящего“ взаимодействия (взаимодействие в куперовском канале). Однако их проявление в полевых зависимостях должно быть таким же, как при слабой локализации, поскольку во всех случаях происходит изменение интерференции в магнитном поле [6].

В образце В в поле $\sim 40 \text{ Э}$ наблюдается скачок МП, который соответствует увеличению сопротивления при росте поля. Этот эффект похож на изученный ранее эффект увеличения МП при разрушении сверхпроводимости в олове [15]. Уменьшение сопротивления образца HgSe:Fe в области сверхнизких температур наблюдалось в [14]. Оно объяснялось наличием сверхпроводящих кластеров Hg, хотя вполне возможно, что переход в сверхпроводящее состояние определяется наличием примеси Fe, поскольку в последнее время обнаружены сверхпроводники на его основе, в том числе FeSe [16]. В самом слабо легированном образце А скачок МП также наблюдается, но он смещен в еще более слабые поля и почти сливается с шумами. В связи с этим зависимость для этого образца здесь не приведена.

Теперь обсудим положительный участок магнитопоглощения. В более сильных полях, по-видимому, проявляется микроволновое поглощение, обусловленное классическим магнитосопротивлением. Этот эффект в вырожденных полупроводниках существенно меньше, чем в невырожденных, и часто им пренебрегают. Однако, как показывает эксперимент, в нашем случае он остается основным в области полей до 4 кЭ , хотя видно, что с ростом концентрации Fe эффект уменьшается. В этом случае полевая зависимость магнитосопротивления определяется соотношением

$$\Delta\rho/\rho_0 = (\pi^2/3)r(kT/\varepsilon_F)(\omega_c\tau_m)^2/[1 + (\omega_c\tau_m)^2], \quad (7)$$

где r — безразмерный показатель степени в зависимости $\tau_m = a\varepsilon^r$, зависящий от типа рассеяния, τ_m — характеристическое время рассеяния импульса, ε — энергия, a — коэффициент пропорциональности, $\omega_c = eH/mc$ — циклотронная частота, остальные обозначения — общепринятые.

Из (7) следует, что в слабых полях, когда $\omega_c\tau_m \ll 1$, магнитосопротивление растет квадратично с полем, а в сильных полях, когда $\omega_c\tau_m \gg 1$, магнитосопротивление насыщается.

Поскольку ЭПР-спектрометр регистрирует производную МП по магнитному полю, то в слабых полях должно выполняться соотношение

$$dP/dH \propto H, \quad (8)$$

а в сильных

$$dP/dH \rightarrow 0. \quad (9)$$

Из рис. 1 видно, что в слабых полях для всех трех образцов dP/dH действительно растет линейно с полем, а в более сильных полях в двух менее легированных образцах производная становится постоянной, указывая на линейный характер зависимости МП от поля. Такая зависимость далека от асимптотических зависимостей (8) и (9). Она описывает зависимость в некотором промежуточном диапазоне полей, но это не противоречит общему соотношению (7).

Из рис. 1 также видно, что с ростом концентрации Fe значение производной dP/dH в одном и том же поле на квадратичном участке постепенно уменьшается. Формула (7) качественно описывает такую зависимость, поскольку в нее входит отношение kT/ε_F , и с ростом энергии уровня Ферми величина производной уменьшается. В то же время измерения зависимости энергии уровня Ферми от концентрации Fe показывают, что уровень Ферми в этой области концентраций Fe привязан к уровню Fe, который находится в зоне проводимости [12]. Альтернативное объяснение может заключаться в том, что при увеличении легирования уменьшается произведение $\omega_c\tau_m$ за счет уменьшения времени рассеяния импульса. Это также должно приводить к уменьшению эффекта.

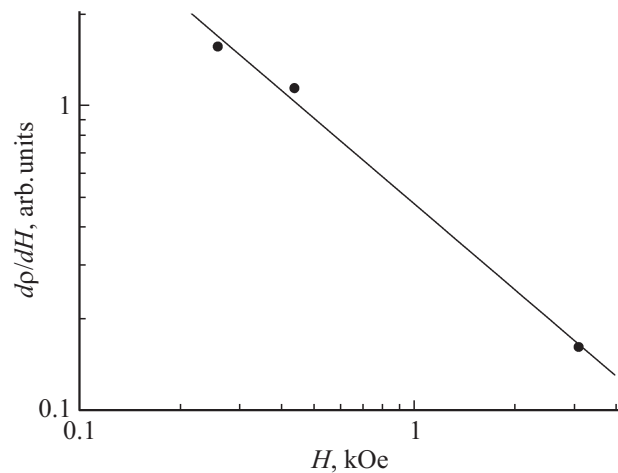


Рис. 3. Концентрационная зависимость производной микро­волнового поглощения от концентрации примеси Fe в магнитном поле $H = 1 \text{ кЭ}$. Прямая соответствует соотношению (10).

Из формулы (7) следует, что в слабых полях, где выполняется зависимость (8), $\Delta\rho/\rho_0 \propto \tau_m^2$. Все остальные параметры — константы. Если рассеяние импульса происходит на примесных атомах Fe, то в постоянном магнитном поле должно выполняться соотношение:

$$dP/dH \propto N_{\text{Fe}}^{-1/2}. \quad (10)$$

На рис. 3 показана зависимость сигнала микроволнового поглощения в магнитном поле 1 кЭ в двойном логарифмическом масштабе. Из него видно, что точки хорошо ложатся на прямую, соответствующую соотношению (10). Таким образом, можно заключить, что рассеяние импульса в этом случае происходит на атомах Fe.

5. Заключение

Анализ микроволнового магнитоиндуцированного поглощения в HgSe позволяет определить некоторые параметры полупроводника. В частности, из наблюдения ОМС в слабых полях можно оценить время сбоя фазы электрона в слабых полях, которое соответствует времени рассеяния энергии. Форма зависимости МП от поля в образце В позволяет предположить, что в этом образце присутствует сверхпроводящая фаза. В области положительного МП наблюдается уменьшение его с ростом концентрации пропорционально корню из концентрации Fe, что указывает на уменьшение времени рассеяния импульса электрона и на то, что импульс в этом случае рассеивается на атомах Fe.

Информационное богатство эффектов МП позволяет их использовать для анализа других вырожденных полупроводников, для которых другие способы определения параметров связаны с методическими трудностями, такими как изготовление качественных контактов, приложение внешних воздействий (полей и температур) и их прочность.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 15-02-08909).

Авторы благодарны П.В. Семенихину за помощь в проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] А.И. Вейнгер, А.Г. Забродский, Т.В. Тиснек, Г. Бискупски. ФТП, **32**, 557 (1998).
- [2] A.I. Veinger, A.G. Zabrodskii, T.V. Tisnek. Phys. Status Solidi B, **218**, 189 (2000).
- [3] A.I. Veinger, A.G. Zabrodskii, T.V. Tisnek, S.I. Goloshchapov. Phys. Status Solidi C, **5**, 835 (2008).
- [4] А.И. Вейнгер, А.Г. Забродский, Т.В. Тиснек, С.И. Голощачов. ФТП, **45**, 1314 (2011).
- [5] B.L. Al'tshuler, A.G. Aronov. In: *Modern Problems in Condensed Matter Sciences. Vol. 10: Electron–Electron Interaction in Disordered Systems*, ed. by V.M. Agranovich, A.A. Maradudin (Amsterdam, 1985).
- [6] Т.А. Полянская, Ю.В. Шмарцев. ФТП, **23** (1), 3 (1989).
- [7] Д. Шенберг. *Магнитные осцилляции в металлах* (М., Мир, 1986) [Пер. с англ.: D. Shoenberg. *Magnetic Oscillations in Metals* (Cam. Univ. Press, 1984)].
- [8] И.И. Ляпилин, И.М. Цидильковский. УФН, **146**, 35 (1985).
- [9] A.I. Veinger, A.G. Zabrodskii, T.V. Tisnek. Supercond. Sci. Technol., **8**, 368 (1995).
- [10] А.И. Вейнгер, А.Г. Забродский, Т.В. Тиснек, К.О. Щавелев, О.С. Щавелев. Письма ЖТФ, **22** (2), 50 (1996).
- [11] И.М. Цидильковский. *Электроны и дырки в полупроводниках* (М., Наука, 1972).
- [12] В.И. Окулов, Т.Е. Говоркова, И.В. Жевстовских, А.Т. Лончаков, К.А. Окулова, Е.А. Памятных, С.М. Андрийчук, Л.Д. Паранчич. ФНТ, **39**, 493 (2013).
- [13] Ч. Пул. *Техника ЭПР спектроскопии* (М., Мир, 1970) [Пер. с англ.: C.P. Poole. *Electron spin resonance* (Int. Pub. N. Y., London, Sydney, 1967)].
- [14] A. Lenard, T. Dietl, M. Sawicki, M. Dobrowolski, K. Dybko, T. Skoskiwicz, S. Miotkowska, A. Witek, W. Plesiewicz, A. Mysielski. J. Low Temp. Phys., **80**, 15 (1990).
- [15] A.I. Veinger, A.S. Kheifets. Physica C, **269** (1–2), 29 (1996).
- [16] Л. Опенов. ПерсТ, **17** (19), 1 (2010).

Редактор Л.В. Шаронова

Magnitodependent microwave absorption in HgSe in low magnetic fields

A.I. Veinger¹, T.V. Tisnek¹, I.V. Kochman¹, V.I. Okulov²

¹ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

² Miheev Institute of Metal Physics,
Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
620137 Ekaterinburg, Russia

Abstract Magnetoresistance effect in the HgSe:Fe semiconductor at microwave frequencies and low temperatures was examined. Negative and positive components of magnetoabsorption that are related to the magnetoresistance effect in the degenerate band were studied. Distinctive features of the experiment at the microwave frequencies are reported. Times of pulse momentum and electron relaxation energy were obtained from the experimental field and temperature dependences of microwave absorption power.