

# СПИН-ОРБИТАЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И ПОДВИЖНОСТЬ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПРОДОЛЬНОМ АВТОСОЛИТОНЕ В АНТИМОНИДЕ ИНДИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

И. К. Камиллов, А. А. Степуренко, А. Э. Гумметов

*Институт физики им. Х. И. Амирханова Дагестанского научного центра РАН*

Поступила в редакцию 10.09.2018 г.

**Аннотация.** Предложена и рассмотрена версия о спин-орбитальном взаимодействии орбитально движущихся и спин-ориентированных электронов в продольном автосолидоне в антимониде индия в продольном магнитном поле. Определена дополнительная энергия, приобретаемая спин-ориентированными электронами вследствие этого взаимодействия.

Получены и вычислены выражения отдельно для изменения подвижности при орбитальном движении электронов в магнитном поле и аддитивной подвижности спин-ориентированных электронов. Рассчитаны коэффициенты взаимного влияния изменяющейся подвижности электронов при орбитальном движении и аддитивной подвижности спин-ориентированных электронов.

**Ключевые слова:** автосолитоны, полупроводники, неравновесность, магнетон Бора, электронно-дырочная плазма, магнитное поле.

## SPIN-ORBITAL INTERACTION AND MOBILITY OF CARRIERS IN THE LONGITUDINAL INSB AUTOSOLITON UNDER MAGNETIC FIELD

I. K. Kamilov, A. A. Stepurenko, A. E. Gummetov

**Abstract.** The version on spin-orbital interactions of orbitally moving and spin-oriented electrons in the longitudinal InSb autosoliton under a longitudinal magnetic field is proposed and considered. The additional energy gained by spin-oriented electrons owing to this interaction is defined.

The expressions are derived and estimated separately for a change in the mobility at the orbital motion of electrons under magnetic field and the additive mobility of spin-oriented electrons. The mutual influence coefficients of changing electron mobility at the orbital motion and the additive mobility of spin-oriented electrons are calculated.

**Keywords:** autosoliton, semiconductors, non-equilibrium, dissipative structure, oscillations, degenerated electron-hole plasma, Bohr magneton, magnetic field.

### ВВЕДЕНИЕ

Продольный автосолитон (АС) в  $p$ -InSb представляет собой динамичный, неоднородный по сечению шнур тока, реализующийся в неравновесной, плотной электронно-дырочной плазме (ЭДП) в сильном электрическом поле. Эти АС как и поперечные были рассмотрены теоретически и исследованы экспериментально в других полупроводниках и полупроводниковых структурах [1–8]. Единственные исследования воздействия магнитного поля на процесс формирования и эволюцию АС представлены в работах [9–16]. Возникающий под действием поперечного магнитного поля гальваномагнитный эффект Эттингсгаузена в продольном АС

[10] приводит к появлению градиента температуры в направлении силы Лоренца, т. е. поперек шнура тока. Именно этот градиент температуры и обеспечивает перемещение АС вдоль сечения образца, обуславливая уменьшение или осцилляции тока в цепи образца. Приложение продольного магнитного поля вызывает исчезновение осцилляций и изменение тока, т. е. к полной блокировке эффекта Эттингсгаузена. Вызвано это вращением электронов в плоскости поперечного сечения образца. Вращающиеся электроны сглаживают поперечный градиент температуры. При определенном значении продольного магнитного поля градиент температуры полностью исчезает и всякое поперечное движение шнура прекращается. Этот интересный результат говорит о факте проявления диамагнетизма продольного АС в продольном магнитном поле [12]. Итак, внесение продольного АС в продольное магнитное поле ( $H$ ) приводит к появлению ансамбля вращающихся электронов вокруг оси, представляющей собой амбиполярный совместный дрейф дырок в электрическом поле [11, 12]. Таким образом, АС становится диамагнетиком, что сказывается на величине подвижности электронов ее уменьшением ( $\mu - \Delta\mu_H$ ). Наличие продольного магнитного поля одновременно скажется на спиновой ориентации части электронов появлением некоторого количества электронов  $\Delta n$ , ориентированных вдоль этого магнитного поля. Создается ситуация возможного взаимодействия суммарного магнитного момента вращающегося ансамбля электронов вокруг некоей оси со спиновым магнитным моментом спин-ориентированных электронов автосолитона, т. е. спин-орбитальное взаимодействие (СОВ) в АС.

Вследствие СОВ исчезает автономность орбитального и спинового движений и возникает зацепление между ними [17]. Зацепление орбитального и спиновых движений делает невозможным разделение изменений подвижности, вызванных чисто орбитальным движением электронов и подвижности, привнесенной спин-ориентацией электронов. Становится, нужно полагать, возможным взаимовлияние параметров подвижности электронов, вызванных их изменениями при орбитальном движении и спиновой поляризации.

### ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЕ РАССМОТРЕНИЕ

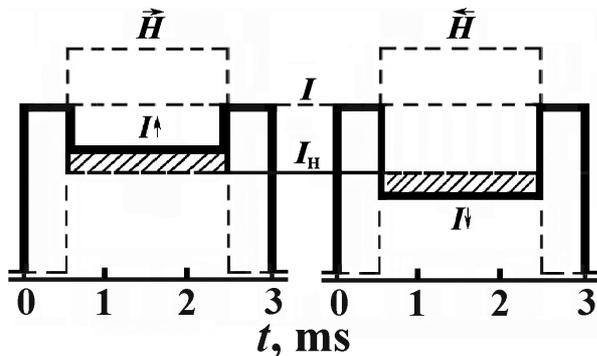


Рис. 1. Графическое изображение экспериментальных осциллограмм импульсов тока автосолитона в продольном магнитном поле противоположных направлений.

Отследить СОВ в автосолитоне можно по поведению тока продольного АС в продольном магнитном поле противоположных направлений одного и того же значения и нулевого. Обратим внимание на рис. 1, где представлено графическое изображение экспериментальных осциллограмм импульсов тока АС в продольном магнитном поле противоположных направлений. Оценим изменение подвижности электронов в продольном АС в продольном магнитном поле, когда электроны вращаются по некоторым орбитам и одновременно часть из них  $\Delta n$  спин-ориентируются.

Запишем токи АС  $I \uparrow$  в продольном магнитном поле при  $\vec{H}$  и  $I \downarrow$  при  $\vec{H}$ :

$$\begin{aligned}
 I \uparrow &= eES[n_e(\mu_a - \Delta\mu_H + C\Delta n_e\Delta\mu/e) + \Delta n_e(\Delta\mu - Pn_e\Delta\mu_H/\Delta n_e) + n_p\mu_a] = \\
 &= eES[n_e(\mu_a - \Delta\mu_H + C\beta\Delta\mu) + n_e\beta\Delta\mu - Pn_e\Delta\mu_H + n_p\mu_a] = \\
 &= (enES/2)[2\mu_a - (1 + P)\Delta\mu_H + (1 + C)\beta\Delta\mu]; \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I \downarrow &= eES[n_e(\mu_a - \Delta\mu_H - C\Delta n_e\Delta\mu/n_e) + \Delta n_e(-\Delta\mu - Pn_e\Delta\mu_H/\Delta n_e) + n_p\mu_a = \\
 &= eES[n_e(\mu_a - \Delta\mu_H - C\beta\Delta\mu) - n_e\beta\Delta\mu - Pn_e\Delta\mu_H + n_p\mu_a] = \\
 &= (enES/2)[2\mu_a - (1 + P)\Delta\mu_H - (1 + C)\beta\Delta\mu], \quad (2)
 \end{aligned}$$

где:  $E$  — напряженность электрического поля, приложенного к образцу,  $n_e$  — концентрация электронов в АС,  $n_e = n_{АС}/2$ ,  $n_p$  — концентрация дырок в АС,  $n_p = n_{АС}/2$ ,  $e$  — заряд электрона,  $S$  — площадь поперечного сечения АС,  $\mu_a$  — амбиполярная подвижность электронов и дырок,  $\mu_a = 2\mu_p$ ,  $\Delta\mu_H$  — изменение подвижности электронов, появляющееся при вращательном движении электронов,  $\Delta n_e$  — число спин-ориентированных электронов в магнитном поле,  $\Delta\mu$  — аддитивная подвижность спин-ориентированных электронов,  $C$  — коэффициент, учитывающий влияние  $\Delta\mu_H$  на  $\Delta\mu$  при СОВ,  $P$  — коэффициент, учитывающий влияние  $\Delta\mu$  на  $\Delta\mu_H$  при СОВ,  $\beta = \Delta n_e/n_e = (\mu_0\mu_B g^2/4\varepsilon_F) \cdot H$  — учитывающий относительное изменение концентрации спин-ориентированных электронов в магнитном поле,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{K}^2$  — магнитная постоянная,  $\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ A}/\text{m}^2 = 0,724 \cdot 10^{-10} e - v/(A/m)$  — квант магнитного момента (магнетон Бора),  $g = -56$  — g-фактор электрона,  $\varepsilon_F$  — энергия Ферми.

В выражениях (1) и (2) присутствуют члены  $P\Delta\mu_H$  и  $C\beta\Delta\mu$ , обусловленные учетом СОВ. Рассмотрим сумму токов в магнитном поле и их разность.

$$\begin{aligned}
 I \uparrow + I \downarrow &= (enES/2)[4\mu_a - 2(1 + P)\Delta\mu_H], \quad (1 + P)\Delta\mu_H = 2\mu_a - (I \uparrow + I \downarrow)/enES, \\
 \Delta\mu_H &= \{[2I - (I \uparrow + I \downarrow)]/I(1 + P)\}\mu_a, \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I \uparrow - I \downarrow &= (enES/2)[2(1 + C)\beta\Delta\mu], \quad (1 + C)\beta\Delta\mu = (I \uparrow - I \downarrow)/enES, \\
 \Delta\mu &= [(I \uparrow - I \downarrow)/I(1 + C)\beta]\mu_a. \quad (4)
 \end{aligned}$$

Поскольку СОВ происходит из-за взаимодействия орбитального магнитного момента электронов  $M_0$  и магнитного момента спин-ориентированных электронов  $M_p$ , естественно, предположить:  $C \sim M_0$ ,  $P \sim M_p$ ,  $C/P = M_0/M_p$ . Если считать совместный вклад  $\Delta\mu_H$  и  $\Delta\mu$  при СОВ за единицу, можно принять  $C + P = 1$ . Получается:  $C = M_0/(M_0 + M_p)$ ;  $P = M_p/(M_0 + M_p)$ . Известно [16]  $M_0 = (-0,2\pi\mu_0 e^2 L^4 \ln_e/m_e) \cdot H_0^2/H_n = -AH_0^2/H_n$ ,  $M_p = \chi H v = BH$ ,  $\chi = n_e\mu_0\mu_B^2 g^2/4\varepsilon_F$  — парамагнитная восприимчивость АС [14],  $L = 10^{-5} m$  — поперечный размер АС,  $l$  — длина АС (образца),  $v = l \cdot S = \pi L^2 l/4$  — объем АС. Принимая все это во внимание, получаем:

$$C = (-AH_0^2/H_n)/(-AH_0^2/H_n + BH) = A/(A - BH_n^2/H_0^2) = A/(A - Bn^2), \quad (5)$$

$$P = BH/(-AH_0^2/H_n + BH) = (-BH_n^2/H_0^2)/(A - BH_n^2/H_0^2) = -Bn^2/(A - Bn^2), \quad (6)$$

где  $n = H_n/H_0$  или  $H_n = nH_0$ ,  $n = 1,2,3 \dots n$ ,  $H_0 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ A}/\text{m}$  — минимальное магнитное поле, при котором циклотронный радиус закручивания электронов становится равным диффузионной длине.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Необходимые экспериментальные исследования проводились на образцах  $p$ -InSb с концентрацией носителей заряда  $p = 1,9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  с подвижностью  $\mu_p = 6870 \text{ см}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  при температуре жидкого азота  $T = 77 \text{ K}$ . За температуру АС можно принять температуру, при которой появляется собственная проводимость в  $p$ -InSb. Экспериментально полученная температурная зависимость электропроводности  $\sigma(T)$  дает  $T_{АС} \approx 150 \text{ K}$ . Отсюда подвижность носителей заряда в АС будет составлять  $\mu_p(150 \text{ K}) = \mu_p(77 \text{ K}) \cdot (150/77)^{-2,1}$  [18], т. е.  $\mu_p = 1697 \text{ см}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ . Измерению подвергалось несколько образцов, отличающихся линейными размерами. Линейный размер  $l$  — длина образца, вдоль которого прикладывалось электрическое поле  $E = V/l$ , варьировался в пределах  $0,1 - 0,02 \text{ см}$ , поперечные размеры  $axb = 0,04$

см<sup>2</sup>. Выбор таких размеров позволял избегать появления поперечных АС, проявляющимися осцилляциями тока в цепи образца, что давало возможность иметь дело только с продольными АС. Исследования заключались в реализации вольтамперных характеристик (ВАХ) и гауссамперных характеристик тока АС (ГАХ) как в импульсном, так и динамическом режимах прикладываемых электрического и магнитного полей. А именно: приложением импульса электрического поля длительностью  $\tau_{\text{И}}$  к образцу возбуждали АС с заданным значением тока  $I_{\text{АС}}$ . Синхронно создавалось в импульсном соленоиде магнитное поле длительностью  $\tau_{\text{Н}} < \tau_{\text{И}}$ . Фиксировалась точка  $I(H)$ . С помощью таких точек, полученных при нарастании магнитного поля, строилась ГАХ. В случае динамического режима во время приложенного импульса электрического поля  $\tau_{\text{И}}$  с помощью импульсного соленоида формировался импульс магнитного поля треугольной формы длительностью  $\tau_{\text{Н}} < \tau_{\text{И}}$ . Длительность импульса электрического поля составляла  $\tau_{\text{И}} = 3 \text{ ms}$ , а длительность импульса магнитного поля  $\tau_{\text{Н}} = 2 \text{ ms}$ . Величина магнитного поля не превышала  $8 \cdot 10^4 \text{ A/m}$ . Величина напряжения электрического поля не превышала десятка вольт.

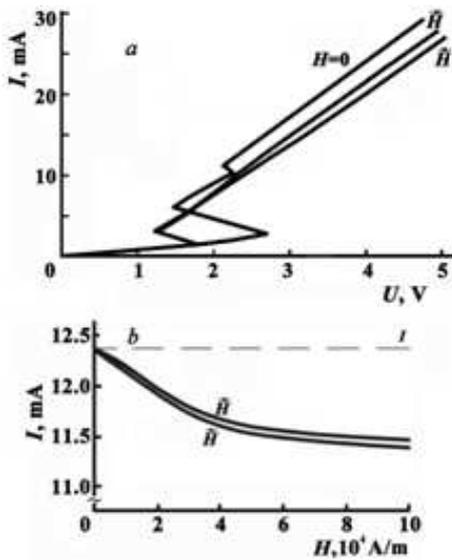


Рис. 2. *a* — вольтамперные характеристики продольного автосолитона в продольном магнитном поле противоположных направлений ( $H \uparrow = 8 \cdot 10^4 \text{ A/m}$ ), *b* — гаусс-амперные тока характеристики продольного автосолитона в продольном магнитном поле противоположных направлений

Предлагается вниманию типичные результаты экспериментальных исследований одного из нескольких образцов. На рис. 2,а представлены ВАХ образца ( $l=0.05 \text{ cm}$ ) в отсутствие ( $H=0$ ) и в присутствии ( $\vec{H}, \vec{H}$ ) внешнего продольного магнитного поля противоположных направлений. Токи на нелинейном участке ВАХ АС при воздействии магнитного поля всегда оказывались меньше. Отличались токи по величине и при переключении направления продольного магнитного поля на противоположное. На рис.2,б представлены ГАХ тока продольного АС при противоположных направлениях продольного магнитного поля. Уменьшение токов с ростом продольного магнитного поля обусловлено не иначе, как изменением подвижности носителей заряда на величину  $-\Delta\mu_{\text{H}}$  по причине искривления траекторий радиально движущихся электронов. Явное различие линий тока на ГАХ при  $\vec{H} \uparrow \text{ P}=\vec{H} \downarrow \text{ P}$  вызвано неким параметром ЭДП, конкретнее электронов, реагирующих именно на направление магнитного поля. Таким параметром является спин электрона  $s\uparrow\downarrow$ , ориентирующийся вдоль приложенного магнитного поля. В магнитном поле согласно предложенному Паули механизма парамагнетизма в АС, представляющемся вырожденной ЭДП ( $n_e = 0.31 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ), появится некоторый избыток электронов  $\Delta n \uparrow = \Delta n \downarrow = \Delta n = n_e\beta$ , спин которых направлен вдоль приложенного магнитного поля.

Магнитный момент этих поляризованных по спину электронов, как показано [14], будет  $M_p = \Delta n\mu_B v = n_e\mu_B\beta v$ . Вращающиеся вокруг дырок электроны создают магнитное поле  $H^0 = -M_0/v$ , которое будет воздействовать на спиновый магнитный момент поляризованных электронов  $M_p$ . Электроны получают дополнительную энергию  $\Delta\varepsilon$ , обусловленную этим взаимодействием и зависящую от ориентации их спинов:  $\Delta\varepsilon = -H^0(\mp M_p) \pm (M_0/v) \cdot n_e\mu_B\beta v = \mp M_0 n_e\mu_B\beta$ . Рассматривая выражение  $\Delta\varepsilon = (\mp 0,2\pi e^2 n_e^2 l L^4 \mu_0^2 \mu_B^2 g^2 H_0^2 4m_e \varepsilon_F) \cdot H/H_n = \mp \Delta\varepsilon_0 \cdot H/H_n$ , следует отметить, что при  $H = H_n$  отношение  $H/H_n = 1$ ,  $\Delta\varepsilon = \mp \Delta\varepsilon_0 \cdot 1$  во всем интервале магнитного поля.

Результаты имеют смысл при  $H \geq H_1 \geq H_0$ ;  $H_n = nH_0$  – фиксированные значения магнитного поля. При  $H < H_2$   $H/H_1 < 2$ , при  $H < H_3$   $H/H_2 < 3/2$ , при  $H < H_4$   $H/H_3 < 4/3$  и т. д.  $H/H_n < n/(n-1)$ ;  $\Delta\varepsilon = \mp\Delta\varepsilon_0$  при  $H = H_n$ ;  $\Delta\varepsilon = \mp\Delta\varepsilon_0 \cdot n/(n-1)$  при  $H < H_n$ . Благодаря тому, что при СОВ у электронов появляется дополнительная энергия  $\Delta\varepsilon = \mp\Delta\varepsilon_0 \cdot n/(n-1)$ , электроны со спином “вверх” и “вниз” приобретают различный дрейфовый импульс в электрическом поле [19].

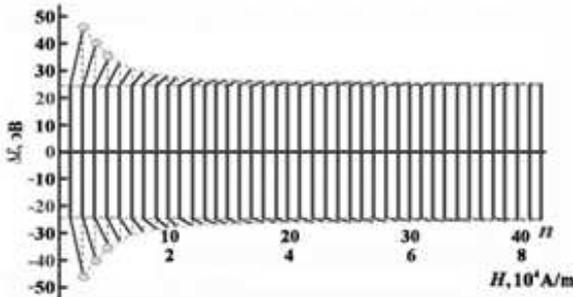


Рис. 3. Дополнительная энергия, приобретаемая спин-ориентированными электронами при СОВ в автосольтоне с ростом продольного магнитного поля ( $H_n = n \cdot 2 \cdot 10^3$  А/м).

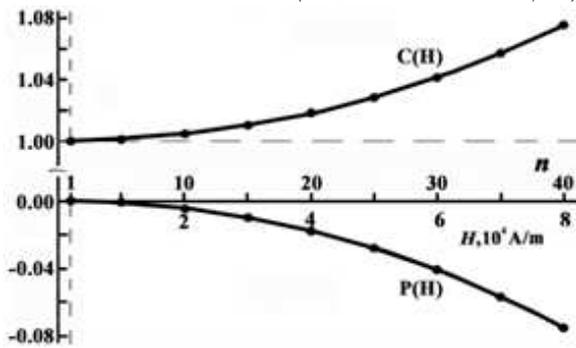


Рис. 4. Коэффициенты  $C$  и  $P$  взаимовлияния при СОВ изменяющейся подвижности при орбитальном движении электронов и аддитивной подвижности спин-ориентированных электронов в продольном автосольтоне в магнитном поле.

Для рассматриваемого образца  $M_0 = -1,17 \cdot 10^{-12} \cdot H_0^2/H_n$  Ам<sup>2</sup>,  $M_p = 5,11 \cdot 10^{-17} \cdot H$  Ам<sup>2</sup>. Подставляя в выражения (5) и (6), получим:  $C = 1/(1 - 4,37 \cdot 10^{-5}n^2)$ ,  $P = -4,37 \cdot 10^{-5}n^2/(1 - 4,37 \cdot 10^{-5}n^2)$ .

На рис. 4. представлены графики зависимости  $C$  и  $P$  от магнитного поля. Можно заметить, что в интервале значений магнитного поля, используемого в экспериментах, величина  $C$  изменяется незначительно и близка к 1 ( $C \approx 1$ ), а величина  $P$  также изменяется незначительно и близка к 0 ( $P \approx 0$ ). Выражения для  $\Delta\mu_H$  и  $\Delta\mu$  можно записать:

$$\Delta\mu_H = \{[2I - (I \uparrow + I \downarrow)]/I\}\mu_a; \quad (7)$$

$$\Delta\mu = [(I \uparrow - I \downarrow)/2I\beta]\mu_a. \quad (8)$$

Возникает аддитивная подвижность спин-ориентированных электронов  $\mu_e \uparrow = \mu_e + \Delta\mu_e$ ,  $\mu_e \downarrow = \mu_e - \Delta\mu_e$ . Различие подвижностей спин-ориентированных электронов “вверх” и электронов “вниз”, скорее всего, определяют отличие линий тока на ГАХ.

Энергия  $\Delta\varepsilon$  обнаруживает затухающее биение своей величины. При известных параметрах образца, постоянных и выражениях для  $M_0$  и  $M_p$  получим  $\Delta\varepsilon$  в окончательном виде:  $\Delta\varepsilon \mp 23,75n/(n-1)$  эВ. График этой зависимости представляет собой циклическое сохранение постоянной величины  $\varepsilon_0 = \mp 23,75$  эВ (с периодом  $n = 1, 2, 3 \dots$ ) с затухающими выбросами в промежутках ( $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{n-1} = 1$ ) рис. 3.

Рассматриваемая версия СОВ в АС позволяет оценить изменение подвижности электронов при их вращательном движении в магнитном поле и спин направленных. Общее изменение подвижности получаем из результатов экспериментальных исследований поведения тока АС в продольном магнитном поле. Составляющую изменения подвижности носителей при вращательном движении в магнитном поле  $\Delta\mu_H$  позволяет получить выражение (3). Составляющую изменения подвижности за счет спиновой ориентации части электронов  $\Delta\mu$  получим из выражения (4).

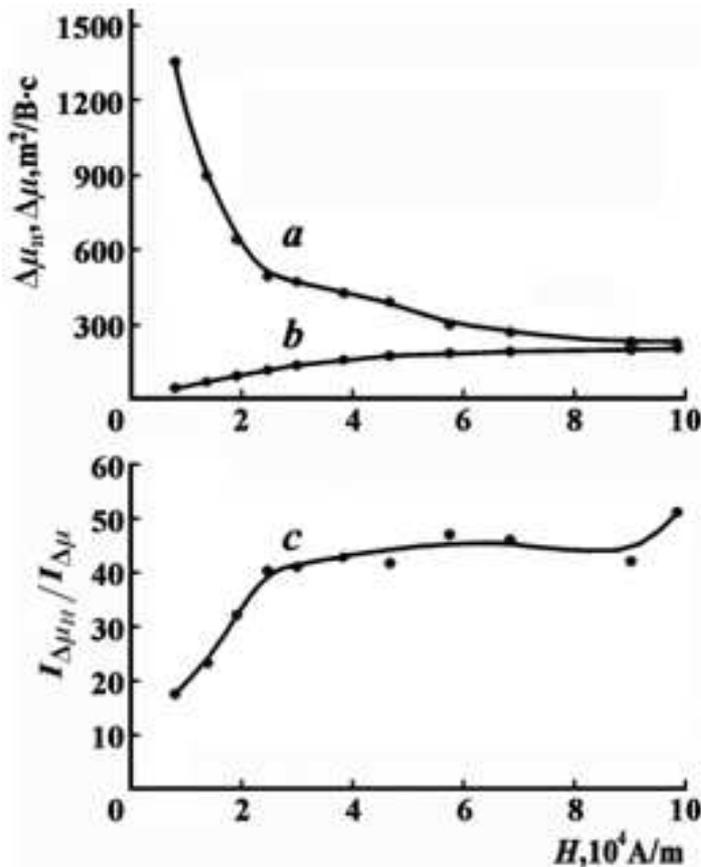


Рис. 5. *a* —  $\Delta\mu$ -аддитивная подвижность спин-ориентированных электронов в продольном автосоли-tone в продольном магнитном поле, *b* —  $\Delta\mu H$  — изменение подвижности электронов при орбитальном движении в продольном авто-солитоне в продольном магнитном поле, *c* — отношение токов  $I_{\Delta\mu H}/I_{\Delta\mu}$  в автосоли-tone, появляющееся в продольном магнитном поле из-за проявления  $\Delta\mu$  и  $\Delta\mu H$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюме таково. Наличие в продольном АС в продольном магнитном поле орбитально движущихся и спин-ориентированных электронов позволило воспользоваться версией о СОВ. Вычислены для конкретных образцов известные выражения для орбитального и спинового магнитных моментов  $M_0 = (-0,2\pi\mu_0 e^2 L^4 n_e / m_e) \cdot H_0^2 / H_n = -1,17 \cdot 10^{-12} \cdot H_0^2 / H_n \text{ Am}^2$ ,  $M_p = (n_e \mu_0 \mu_B^2 g^2 v / 4\epsilon_F) \cdot H = 5,11 \cdot 10^{-17} \cdot H \text{ Am}^2$  соответственно.

Произведена оценка дополнительной энергии, которую получают спин-ориентированные электроны при СОВ  $\Delta\epsilon = (\mp 0,2\pi e^2 n_e^2 l L^4 \mu_0 \mu_B^2 g^2 H_0 / 4m_e \epsilon_F) \cdot H / H_n = \mp 23,75 (H / H_n) \text{ эВ} = 23,75 \text{ эВ}$  при  $H = H_n$  во всем интервале магнитного поля.

Феноменологически определены изменения подвижности  $\Delta\mu_H(H)$  по причине искривления траектории движения электронов и аддитивная подвижность  $\pm\Delta\mu(H)$  спин-ориентированных электронов. Феноменологически рассмотрено взаимовлияние —  $\Delta\mu_H(H)$  и  $\Delta\mu(H)$  через взаимодействие орбитального и спинового магнитных моментов электронов АС. Получены выражения введенных коэффициентов взаимовлияния *C* и *P* и их графическое

Получается, что  $\Delta\mu_H$  не изменяется вследствие СОВ, поскольку спиновый магнитный момент  $M_p$  слишком мал и вклад его в СОВ ничтожно мал в измеряемом интервале магнитного поля. Что касается  $\Delta\mu$ , то оно согласно выражению (8) заметно уменьшается из-за того, что орбитальный магнитный момент  $M_0$  максимален при магнитных полях, приходящихся на начало измеряемого интервала, и вклад его в СОВ преимуществен. Графическая реализация аналитических выражений (7) и (8) с учетом экспериментальных результатов (рис.2,b) осуществлена на рис. 5, а, б. Видно, что аддитивная подвижность спин-ориентированных электронов  $\Delta\mu$  превышает или сравнима с изменением подвижности всех электронов  $\Delta\mu_H$  в магнитном поле. Однако, если оценить вклад тока всех носителей с подвижностью  $\Delta\mu_H I_{\Delta\mu_H} = eESn_e \Delta\mu_H$  и вклад тока спин-ориентированных электронов с аддитивной подвижностью  $\Delta\mu I_{\Delta\mu} = eES\Delta n \Delta\mu = eESn_e \beta \Delta\mu$  в общий ток *I*, то получим  $I_{\Delta\mu H} > I_{\Delta\mu}$ . На рис. 5, с показано отношение этих токов  $I_{\Delta\mu H} / I_{\Delta\mu} = \Delta\mu_H / \Delta\mu \beta = 2[2I - (I \uparrow + I \downarrow)] / (I \uparrow - I \downarrow)$ .

изображение для конкретного образца, откуда следует, что  $C \approx 1$ ,  $P \approx 0$  в используемом интервале магнитного поля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Observation of Low Frequency Current Pulses in Si  $p-n$  Diodes / T. Hayashi, T. Morita, M. Fukaya, E. Hasegawa // Japan J. Appl. Phys. — 1974. — V. 13, № 10. — 1667 p.
2. Кернер, Б. С. Многошнуровые и многодоменные стационарные состояния в горячей электронно-дырочной плазме GaAs / Б. С. Кернер, В. Ф. Синкевич // Письма ЖЭТФ. — 1982. — Т. 36. — 359 с.
3. Расслоение электронно-дырочной плазмы и голубая электролюминесценция в области статического домена GaAs / Б. С. Кернер, В. В. Осипов, М. Т. Романенко, В. Ф. Синкевич // Письма в ЖЭТФ. — 1986. — V. 44. — 77 с.
4. Расслоение инжектированной электронно-дырочной плазмы высокой плотности в пленках арсенида галлия / В. А. Ващенко, Б. С. Кернер, В. В. Осипов, В. Ф. Синкевич // ФТП. — 1989. — Т. 23. — 1378 с.
5. Винославский, М. Н. Экспериментальное обнаружение горячих автосолионов большой амплитуды в слабо разогретой электрическим полем электронно-дырочной плазме / М. Н. Винославский // ФТТ. — 1989. — Т. 31. — 315 с.
6. Symanczyk, R. Observation of spatio-temporal structures due to current filaments in Si pin diodes // R. Symanczyk, S. Gaelings, D. Jäger // Phys. Lett. A. — 1991. — V. 160. — 397 p.
7. Степуренко, А. А. Автосолионы в антимониде индия / А. А. Степуренко // ФТП. — 1994. — Т. 28. — 402 с.
8. Степуренко, А. А. Автосолионы в разогретой и возбужденной импульсом электрического поля электронно-дырочной плазме антимонида индия / А. А. Степуренко // ФТП. — 1996. — Т. 30. — 76 с.
9. Степуренко, А. А. Намагниченность и диамагнетизм продольного автосолитона в p-InSb во внешнем продольном магнитном поле / А. А. Степуренко, И. К. Камилов, А. Э. Гумметов // ФТП. — 2007. — Т. 41. — 286 с.
10. Влияние поперечного магнитного поля на поведение продольных автосолионов в p-InSb / А. А. Степуренко, И. К. Камилов, А. С. Ковалёв, А. Э. Гумметов // ФТП. — 2008. — Т. 42. — 393 с.
11. Степуренко, А. А. Особенности формирования и эволюции продольного автосолитона в p-InSb в продольном магнитном поле / А. А. Степуренко, И. К. Камилов, А. Э. Гумметов // ФТП. — 2010. — Т. 44. — 721 с.
12. Степуренко, А. А. Гальваномагнитные явления в продольном автосолидоне в p-InSb в поперечном и продольном магнитных полях / А. А. Степуренко, И. К. Камилов, А. Э. Гумметов // ФТП. — 2011. — Т. 45. — 456 с.
13. Степуренко, А. А. Автосолионы в монокристаллах низкоомного антимонида индия и теллура в магнитном поле / А. А. Степуренко, И. К. Камилов, А. Э. Гумметов // ФТП. — 2012. — Т. 46. — 918 с.
14. Степуренко, А. А. Спиновая поляризация электронов и ток в продольном автосолидоне в p-InSb в продольном магнитном поле / А. А. Степуренко, И. К. Камилов, А. Э. Гумметов // ФТП. — 2014. — Т. 48. — 145 с.
15. Kamilov I. K. Diamagnetism of Longitudinal Autosoliton in p-InSb in Longitudinal Magnetic Field / I. K. Kamilov, A. A. Stepurenko, A. E. Gummetov // International Journal of Modern Physics and Applications. — 2015. — V. 1, № 4. — 169 p.
16. Степуренко, А. А. Намагниченность и диамагнетизм продольного автосолитона в p-InSb во внешнем продольном магнитном поле / А. А. Степуренко, И. К. Камилов, А. Э. Гумметов // ФТТ. — 2016. — Т. 58. — 1296 с.

17. Рашба Э. И. Комбинированный резонанс в полупроводниках / Э. И. Рашба // УФН. — 1964. Т. 84, вып. 4. — 557 с.
18. Semiconducting III – V Compounds., Permamon Press / С. Hilsum and A. C. Rose-Innes // Oxford. London. New York. Paris, 1961. — 323 p.
19. Голуб, Л. Е. Ориентация спинов электрическим током в гетероструктурах и объемных полупроводниках / Л. Е. Голуб // Тезисы докладов. VII Российская конференция по физике полупроводников. — Москва, 2005. — 35 с.

## REFERENCES

1. Hayashi T., Morita T., Fukaya M., Hasegawa E. Observation of Low Frequency Current Pulses in Si  $p - \nu - n$  Diodes. Japan J. Appl. Phys., 1974, vol. 13, № 10, 1667 p.
2. Kerner B.S., Sinkevich V.F. Multi-string and multi-domain stationary states in a hot electron-hole GaAs plasma. [Kerner B.S., Sinkevich V.F. Mnogoshnurovie i mnogodomennie stacionarnie sostoyaniy v gorychei electronno-dirochnoi plazme]. *Pis'ma v Zhurnal e'ksperimental'noj i teoreticheskoy fiziki — Pis'ma v Zhurnal e'ksperimental'noj i teoreticheskoy fiziki*, 1982, vol. 36, 359 p.
3. Kerner B.S., Osipov V.V., Romanenko M.T., Sinkevich V.F. Stratification of the electron-hole plasma and blue electroluminescence in the region of the static GaAs domain. [Kerner B.S., Osipov V.V., Romanenko M.T., Sinkevich V.F. Rassloenie electronno-dirochnoi plazmi v oblasti goluboi electroluminescensii staticheskogo domena GaAs]. *Pis'ma v Zhurnal e'ksperimental'noj i teoreticheskoy fiziki — Pis'ma v Zhurnal e'ksperimental'noj i teoreticheskoy fiziki*, 1986, vol. 44, 77 p.
4. Vashenko V.A., Kerner B.S., Osipov V.V., Sinkevich V.F. Stratification of an injected high-density electron-hole plasma in gallium arsenide films. [Vashenko V.A., Kerner B.S., Osipov V.V., Sinkevich V.F. Rassloenie inzhektirovannoi electronno-dirochnoi plazmi visokoi plotnosti v plenkach arsenida galliy]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov — Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 1989, vol. 23, 1378 p.
5. Vinoslavskii M.N. Experimental detection of hot autosolitons of large amplitude in a weakly electron-hole plasma heated by an electric field. [Vinoslavskii M.N. Eksperimentalnoe obnaruzhenie gorychich avtosolitonov bolshoi amplitudi v slabo razogretoi elektricheskim polem electronno-dirochnoi plazme]. *Fizika tverdogo tela — Fizika tverdogo tela*, 1989, vol. 31, 315 p.
6. Symanczyk R., Gaelings S., Jäger D. Observation of spatio-temporal structures due to current filaments in Si pin diodes. Phys. Lett. A, 1991, vol. 160, 397 p.
7. Stepurenko A.A. Autosolitons in indium antimonide. [Stepurenko A.A. Avtosolitoni v antimonide indiya]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov — Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 1994, vol. 28, 402 p.
8. Stepurenko A.A. Autosolitons in a heated and excited by an electric field pulse electron-hole plasma of indium antimonide. [Stepurenko A.A. Avtosolitoni v razogretoi i vzbuzhdennoi impul'som elektricheskogo poly electronno-dirochnoi plazme antimonida indiy]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov — Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 1996, vol. 30, 76 p.
9. Kamilov I.K., Stepurenko A.A., Gummetov A.E. The longitudinal autosoliton movement in the  $p$ -InSb in the transverse magnetic field. [Kamilov I.K., Stepurenko A.A., Gummetov A.E. Dvizhenie prodol'nogo avtosolitona v  $p$ -InSb v poperechnom magnitnom pole]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov — Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2007, vol. 41., 286 p.
10. Kamilov I.K., Stepurenko A.A., Gummetov A.E., Kovalev A.S. Influence of a cross magnetic field on behaviour longitudinal autosolitons in  $p$ -InSb. [Kamilov I.K., Stepurenko A.A., Gummetov A.E., Kovalev A.S. Vliyanie poperechnogo magnitnogo poly na povedenie prodol'niech avtosolitonov v  $p$ -InSb]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov — Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2008, vol. 42, 393 p.

11. Kamilov I.K., Stepurenko A.A., Gummetov A.E. Features of formation and evolution of the longitudinal autosolitons in p-InSb in a longitudinal Magnetic Field. [Kamilov I.K., Stepurenko A.A., Gummetov A.E. Osobennosti formirovaniya i evolucii prodol'nogo avtosolitona v p-InSb v prodol'nom magnitnom pole]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov — Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2010, vol. 44, 721 p.
12. Kamilov I.K., Stepurenko A.A., Gummetov A.E. Galvanomagnetic of the phenomenon of the longitudinal autosoliton in p-InSb at the cross and longitudinal magnetic fields. [Kamilov I.K., Stepurenko A.A., Gummetov A.E. gal'vanomagnitnie yvleniy v prodol'nom avtosolitone v p-InSb v skreshenniech magnitniech polyach]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov — Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2011, vol. 45, 456 p.
13. Kamilov I.K., Stepurenko A.A., Gummetov A.E. Autosolitons in monocrystals of low-resistance indium antimonide and tellurium in magnetic field. [Kamilov I.K., Stepurenko A.A., Gummetov A.E. Avtosolitonie v monokristallach nizkoomnogo indiya]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov — Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2012, vol. 46, 918 p.
14. Kamilov I.K., Stepurenko A.A., Gummetov A.E. The spin polarization of electrons and the current of the longitudinal autosoliton in p-InSb in the longitudinal magnetic field. [Kamilov I.K., Stepurenko A.A., Gummetov A.E. Spinovaya polyrizaciy elektronov i tok v prodol'nom avtosolitone v prodol'nom magnitnom pole]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov — Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2014, vol. 48, 145 p.
15. Kamilov I.K., Stepurenko A.A., Gummetov A.E. Diamagnetism of Longitudinal Autosoliton in p-InSb in Longitudinal Magnetic Field. *International Journal of Modern Physics and Applications*, 2015, vol. 1, no. 4, 169 p.
16. Kamilov I.K., Stepurenko A.A., Gummetov A.E. Magnetization and diamagnetism of a longitudinal autosoliton in p-InSb in an external longitudinal magnetic field. [Kamilov I.K., Stepurenko A.A., Gummetov A.E. Namagnichennost' i diamagnetizm prodol'nogo avtosolitona v p-InSb vo vneshnem prodol'nom magnitnom pole]. *Fizika tverdogo tela — Fizika tverdogo tela*, 2016, vol. 58, 1296 p.
17. Rashba E.I. Combined resonance in semiconductors. [Rashba E.I. Kombinirovannye rezonanc v poluprovodnikach]. *Uspehi fizicheskix nauk — Physics-Uspekhi*, 1964, vol. 84, iss. 4, 557 p.
18. Semiconducting III – V Compounds., Permamon Press. C. Hilsum and A.C. Rose-Innes. Oxford. London. New York. Paris, 1961, 323 p.
19. Golub L.E. Spin orientation by electric current in heterostructure bulk semiconductor. [Golub L.E. Orientaciy spinov electrichestkim tokom v geterostrukturach i ob'emnich poluprovodnikach]. In *Proceedings of the 7th Russian Conference on Semiconductor Physics*, Moscow, Sept. 2005, 18–23, 35 p.

Камилов Ибрагимхан Камилович, член-корр. РАН, д.ф. – м.н., гл. науч. сотр., Институт физики им. Х. И. Амирханова Дагестанского научного центра РАН, Махачкала, Республика Дагестан, Россия  
E-mail: stepurenko-a@yandex.ru

Kamilov Ibragimkhan Kamilovich, corresponding member RAS, Institute of Physics, Daghestan Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Daghestan, Russia  
E-mail: stepurenko-a@yandex.ru

*Степуренко Анатолий Александрович, к.ф. – м.н., ведущ. науч. сотр., Институт физики им. Х. И. Амирханова Дагестанского научного центра РАН, Махачкала, Республика Дагестан, Россия  
E-mail: stepurenko-a@yandex.ru*

*Stepurenko Anatoliy Aleksandrovich, l.r., Institute of Physics, Daghestan Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Dagestan, Russia  
E-mail: stepurenko-a@yandex.ru*

*Гумметов Адиль Эубович, науч. сотр., Институт физики им. Х. И. Амирханова Дагестанского научного центра РАН, Махачкала, Республика Дагестан, Россия  
E-mail: stepurenko-a@yandex.ru*

*Gummetov Adil' Eubovich, r., Institute of Physics, Daghestan Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Dagestan, Russia  
E-mail: stepurenko-a@yandex.ru*