

## Автосолитоны в монокристаллах низкоомного антимонида индия и теллура в магнитном поле

© И.К. Камилов, А.А. Степуренко<sup>¶</sup>, А.Э. Гумметов

Институт физики Дагестанского научного центра Российской академии наук,  
367003 Махачкала, Россия

(Получена 24 ноября 2011 г. Принята к печати 6 декабря 2011 г.)

Экспериментально показано, что продольные автосолитоны, возбужденные джоулевым разогревом сильным электрическим полем образцов низкоомного  $p$ -InSb ( $p \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) и  $p$ -Te ( $p \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ), не чувствительны к воздействию магнитного поля. Вызвано это диамагнетизмом, возникающим у продольного автосолитона вследствие самопинчевания. Аналогичное поведение продольного автосолитона проявляется в высокоомных образцах  $p$ -InSb ( $p \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ) при диамагнетизме, возникающем при  $\theta$ -пинче во внешнем продольном магнитном поле

### Введение

Ряд нелинейных явлений переноса носителей заряда в полупроводниках в сильном электрическом поле определяется их фундаментальными свойствами. Акустоэлектрический эффект, заключающийся в том, что вследствие акустоэлектронного взаимодействия в пьезополупроводниках происходят генерация и усиление акустических колебаний в электрических полях, когда дрейфовая скорость носителей заряда  $v_{dr}$  становится сравнимой с фазовой скоростью акустической волны или превышающей ( $v_{dr} \geq v_{ph}$ ). В результате на вольт-амперной характеристике появляется участок насыщения или излом, а на временной реализации тока — акустоэлектрические осцилляции [1–3]. Эффект Ганна, проявляющийся в многодолинных полупроводниках высокочастотными осцилляциями, вызван механизмом Ридли–Уоткинса–Хилсума [4–6]. Одним из интересных и красивых явлений нелинейной физики является образование в некоторых системах полупроводников автосолитонов (АС) — стационарных уединенных состояний. В частности, при возбуждении нелинейной динамической системы, каковой является неравновесная электронно-дырочная плазма (ЭДП), созданная одним из перечисленных способов: фотовозбуждением, сильным электрическим полем, инжекцией, доменами Ганна, развалом экситонов, джоулевым разогревом, — в ней формируется диссипативная структура. Для нее характерно наличие устойчивых сильно неравновесных уединенных областей экстремальной концентрации носителей заряда и их температуры — АС [7]. В электрическом поле в неплотной ЭДП формируются поперечные АС, представляющие собой локализованные области пониженной концентрации носителей заряда и их повышенной температуры — горячие АС [8]. В несимметричной ЭДП ( $\mu_e \gg \mu_p$ ) поперечные АС движутся в электрическом поле в виде доменов сильного электрического поля [9]. В плотной ЭДП ( $\mu \propto 1/n$ ,  $j = \sigma E \propto T^{3/2} E$ ) формируются продольные АС в виде шнура тока с резко

неоднородным поперечным распределением концентрации носителей заряда и их температуры [10,11]. Экспериментальные исследования поведения поперечных и продольных АС в  $p$ -InSb с  $p \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$  в магнитном поле показали сильное влияние как поперечного, так и продольного магнитных полей. В [12] экспериментально показано, что продольное магнитное поле сравнительно небольшой величины вызывает существенное изменение скорости движения поперечных АС в образцах InSb. При этом частота и амплитуда колебаний тока во внешней цепи образца увеличиваются или уменьшаются в зависимости от направления продольного магнитного поля. В [13] показано, что слабое продольное магнитное поле вызывало резкие скачки тока, обусловленные делением продольного АС. Исходный ток АС после воздействия магнитного поля принимает другое стабильное значение. Восстановление исходного состояния происходит после взаимодействия магнитного поля противоположного направления. Пороговые характеристики формирования продольного АС понижаются в продольном магнитном поле, появляются диамагнитные свойства АС, которые сохраняются и после прекращения воздействия продольного магнитного поля [14]. При магнитных полях свыше  $8 \cdot 10^3 \text{ А/м}$  возбуждаются неустойчивости тока с частотой в пределах 2–20 кГц.

Исследования поведения АС в скрещенных магнитном и электрическом полях показали [15], что при магнитных полях  $6.7 \cdot 10^3$ – $3.2 \cdot 10^4 \text{ А/м}$  продольный АС движется со средней скоростью  $2 \cdot 10^2$ – $2 \cdot 10^3 \text{ см/с}$  в направлении периферии образца, отличающейся пониженной температурой, где неустойчивое существование АС приводит к цикличности процесса, обуславливая колебания тока в цепи образца с частотой 2144–2688 Гц.

Как отмечалось выше, исследованиям подвергались образцы компенсированного хромом антимонида индия с концентрацией носителей  $p \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 77 \text{ К}$ . Первоначальные исследования образцов  $p$ -InSb с концентрацией дырок  $p \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$  показали, что в них формируется АС (шнур тока), но при значительно больших значениях тока. При этом воздействие поперечного магнитного поля на эти АС не обнаруживалось.

<sup>¶</sup> E-mail: stepurenko-a@yandex.ru

Была поставлена задача более детально и корректно исследовать образцы кристалла  $p$ -InSb с концентрацией носителей заряда  $p = 8.9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и подвижностью  $\mu_p = 7100 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ , кристаллы теллура с концентрацией дырок  $p = 1.45 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и подвижностью  $\mu_p = 2400 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при температуре  $T = 77 \text{ К}$ . Исследовались образцы с размерами  $\sim 0.5 \text{ см}$ . Неравновесная ЭДП и продольные АС создавались джоулевым разогревом при воздействии на образец квазипостоянного электрического поля [16].

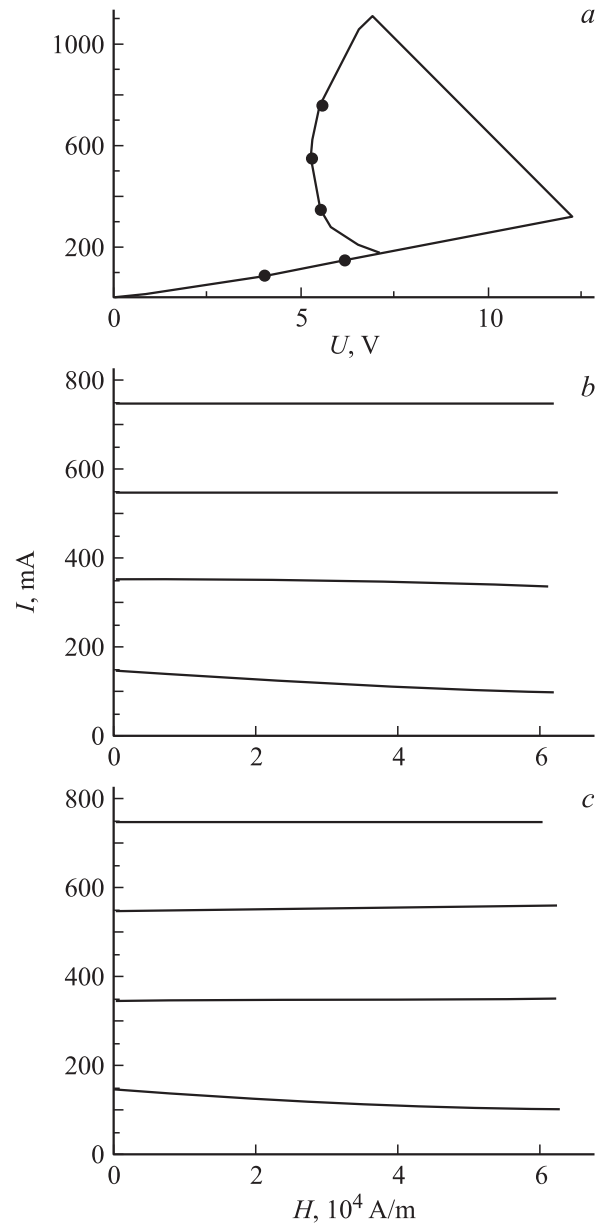
Проведенные экспериментальные исследования поведения тока продольного АС в образцах низкоомного  $p$ -InSb ( $p \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) и  $p$ -Te ( $p \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) в поперечном и продольном магнитных полях обозначили ряд явлений, которые существенно отличаются от тех, которые проявились при исследовании образцов с более низкой проводимостью (концентрацией  $p \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ).

Сначала формировались вольт-амперные характеристики (ВАХ). На рис. 1, *a* представлена ВАХ образца  $p$ -InSb с  $p = 8.9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и подвижностью  $\mu_p = 7100 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при  $T = 77 \text{ К}$ . Исследовалось поведение в магнитном поле токов АС, соответствующих точкам на ВАХ, отображающих процесс формирования этого АС и изменение его тока с ростом электрического поля.

На рис. 1, *b* представлены изменения токов АС разных значений с ростом поперечного магнитного поля, т.е. гаусс-амперные характеристики (ГАХ). Видно, что уменьшение тока с ростом магнитного поля происходит для токов, расположенных на линейном участке ВАХ. Это связано, скорее всего, с магниторезистивным эффектом. Токи, соответствующие нелинейному участку ВАХ, почти не изменяются с ростом магнитного поля. Подобное поведение тока АС реализуется и в продольном магнитном поле рис. 1, *c*.

На рис. 2, *a* представлены ВАХ образца  $p$ -Te с  $p = 1.45 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и подвижностью  $\mu_p = 2400 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при  $T = 77 \text{ К}$ . Как видно из рис. 2, *a* и 1, *a*, вольт-амперные характеристики идентичны. На рис. 2, *b* показаны зависимости разных токов АС в теллуре от возрастающего поперечного магнитного поля (ГАХ). Согласно рис. 2, *b*, ток АС практически не изменяется при воздействии поперечного магнитного поля до  $8 \cdot 10^4 \text{ А/м}$ . То же самое можно сказать и о поведении тока продольного АС в теллуре в продольном магнитном поле. На рис. 2, *c* приводится изменение разных токов продольного АС с ростом продольного магнитного поля.

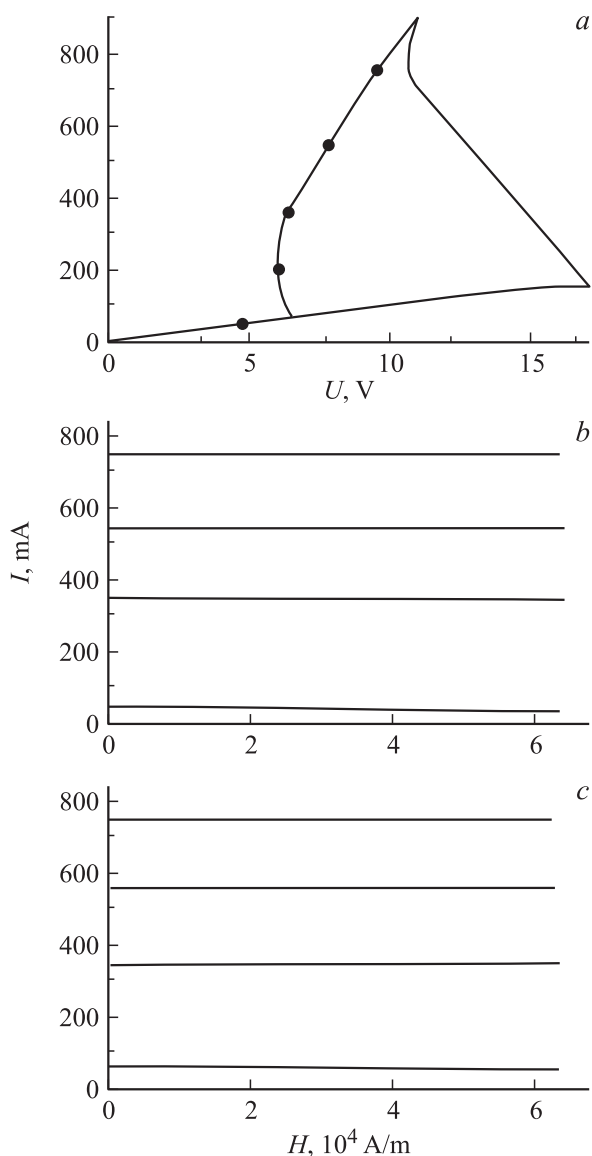
С целью выявления механизма происходящих процессов при воздействии поперечного и продольного магнитных полей на поведение тока АС в низкоомных образцах  $p$ -InSb и  $p$ -Te следующим этапом, очевидно, является проведение подобных экспериментальных исследований высокоомных образцов  $p$ -InSb ( $p \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ). Неравновесная ЭДП и продольные АС создавались джоулевым разогревом при воздействии на образец импульса электрического поля длительностью  $\tau_E = 4 \text{ мс}$ . Образец помещался в устройство, состоящее из двух



**Рис. 1.** *a* — вольт-амперная характеристика низкоомного  $p$ -InSb; *b* — гаусс-амперные характеристики разных токов продольного АС в поперечном магнитном поле; *c* — гаусс-амперные характеристики разных токов продольного АС в продольном магнитном поле.

соленоидов, создающих поперечное и продольное магнитные поля относительно направления электрического поля, прикладываемое к образцу. Длительность импульсов магнитных полей  $\tau_H$ , их величина и направление ( $N \rightarrow S, S \leftarrow N$ ) регулировались автономно, при этом  $\tau_{H\parallel} < \tau_{H\perp} < \tau_E$  ( $2 < 2.7 < 4 \text{ мс}$ ).

На рис. 3, *a* представлены ВАХ образца  $p$ -InSb с концентрацией носителей  $p = 1.9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  и их подвижностью  $\mu_p = 6870 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . При напряжении  $U_{th} = 1.6 \text{ В}$  на ВАХ появляется скачок тока, как результат образования ЭДП за счет джоулева разогрева образца. Этот



**Рис. 2.** *a* — вольт-амперная характеристика Те; *b* — гаусс-амперные характеристики разных токов продольного АС в поперечном магнитном поле; *c* — гаусс-амперные характеристики разных токов продольного АС в продольном магнитном поле.

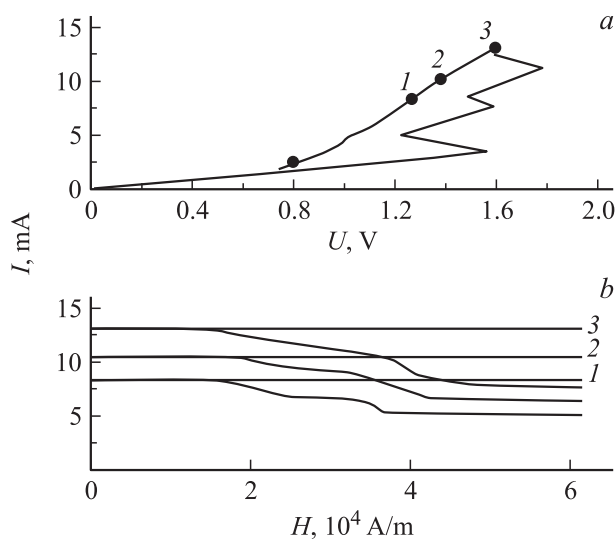
ток сохраняется с ростом напряжения до некоторого значения, затем снова появляется скачок. Скачки тока и его слабое изменение в некоторых пределах напряжения связаны с образованием и существованием АС в виде шнура тока — продольный АС.

На рис. 3, *b* приведены зависимости трех разных токов продольного АС (обозначенных на ВАХ рис. 3, *a* точками 1,2,3) от поперечного магнитного поля  $H_{\perp}$  ( $\Gamma A X_{H_{\perp}}$ ) в отсутствие (кривые линии) и в присутствии (прямые линии) продольного магнитного поля  $H_{\parallel} = 7.2 \cdot 10^4 \text{ A/m} = \text{const}$ .

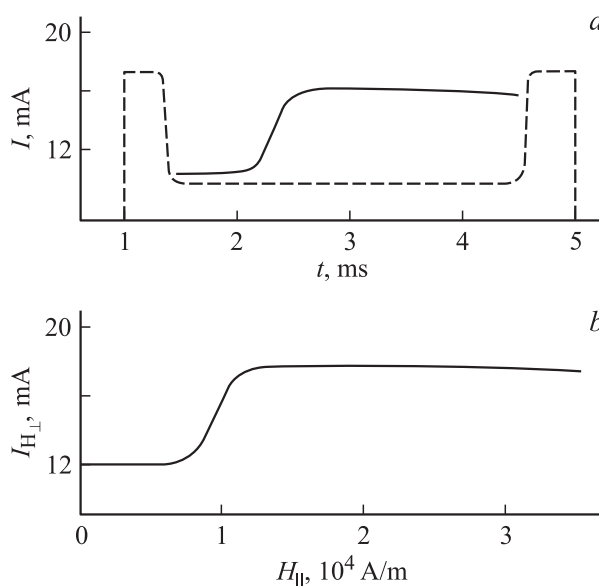
Из экспериментальных результатов, отображенных на этом рисунке, следует, что ток продольного АС в

поперечном магнитном поле не изменяется при одновременном воздействии продольным магнитным полем постоянной величины (рис. 3, *b*, линии 1,2,3). В отсутствие же продольного магнитного поля влияние поперечного магнитного поля на ток продольного АС значительно, с присущим этому влиянию особенностями, показанными в работах [15,17].

На рис. 4 представлены результаты экспериментальных исследований, описанные в нашей работе [18]. И здесь показано, что влияние поперечного магнитного



**Рис. 3.** *a* — вольт-амперная характеристика высокоомного *p*-InSb; *b* — гаусс-амперные характеристики разных токов продольного АС в поперечном магнитном поле в отсутствие (кривые линии) и в присутствии (прямые линии) продольного магнитного поля.



**Рис. 4.** *a* — временная реализация тока продольного АС в поперечном магнитном поле ( $H_{\perp} = \text{const}$ ) — пунктирная линия и *b* —  $\Gamma A X_{H_{\parallel}}$  в продольном магнитном поле [18].

поля на ток продольного АС блокируется при воздействии продольным магнитным полем.

Отсутствие влияния магнитного поля на ток продольного АС в низкоомных образцах  $p$ -InSb и  $p$ -Te можно понять, исходя из результатов, полученных при экспериментальных исследованиях влияния магнитного поля на поведение тока АС в высокоомных образцах [18]. В этой работе показано, что продольный АС под действием поперечного магнитного поля вследствие эффекта Эттингсгаузена приобретает градиент температуры в направлении силы Лоренца. Этот градиент температуры и обеспечивает перемещение АС в направлении периферии образца, отличающейся пониженной температурой, где продольный АС исчезает, обуславливая отрицательный скачок тока. С другой стороны, в продольном магнитном поле продольный АС — шнур тока вследствие  $\theta$ -пинча становится диамагнетиком, т.е. представляет собой цилиндр, состоящий из спиралей траекторий движущихся вокруг обогащенной дырками области электронов, создающих собственное магнитное поле. Вращающиеся электроны переносят тепло от горячего фронта шнура тока к холодному, вследствие чего перепад температур фронтов шнура тока, обеспечивающий движение шнура, сглаживается, отчего скорость шнура падает. И при некоторой величине продольного магнитного поля градиент температуры в шнуре тока исчезает, что приводит к прекращению движения шнура тока, хотя прежде поперечное магнитное поле присутствует. Заключение таково — появляющийся гальваномагнитный эффект Эттингсгаузена в продольном АС в поперечном магнитном поле полностью блокируется диамагнитным эффектом, возникающим в АС при  $\theta$ -пинче, и, как следствие этого, воздействие поперечного магнитного поля на ток продольного АС не проявляется и экспериментально не обнаруживается.

Можно предположить, что шнур тока — продольный АС в низкоомных образцах в силу гораздо больших токов подвержен  $Z$ -пинчу со всеми вытекающими отсюда последствиями, что, очевидно, и приводит к отсутствию влияния поперечного магнитного поля на ток АС.

Таким образом, экспериментально показано, что продольные АС, возбужденные джоулевым разогревом в сильном электрическом поле образцов низкоомного  $p$ -InSb ( $p \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) и  $p$ -Te ( $p \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ), не чувствительны к воздействию как поперечного, так и продольного магнитных полей. Возникающий в поперечном магнитном поле эффект Эттингсгаузена блокируется диамагнетизмом, возникающим у продольного автосолитона вследствие реализации  $Z$ -пинча. Аналогичное поведение продольного АС проявляется в высокоомных образцах  $p$ -InSb ( $p \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ) при диамагнетизме, возникающем при  $\theta$ -пинче во внешнем продольном магнитном поле [14].

Воздействие продольного магнитного поля на ток продольного АС в низкоомных образцах не происходит по той причине, что реализующийся  $Z$ -пинч заменяет

$\theta$ -пинч, через который и осуществляется влияние продольного магнитного поля на ток АС в высокоомных образцах  $p$ -InSb.

## Список литературы

- [1] R.W. Smith. Phys. Rev. Lett., **9**, 87 (1962).
- [2] A.R. Hutson. Phys. Rev. Lett., **9**, 296 (1962).
- [3] В.И. Пустовойт. УФН, **97**, 257 (1969).
- [4] В.К. Ridley. T.B. Watkins. Phys. Soc., **78**, 293 (1961).
- [5] С.Н. Hilsum. Proc. IRE, **50**, 185 (1962).
- [6] A.G. Chynoweth, W.L. Feldman, D.E. McCumber. Proc. Int. Conf. Phys. Semicond. (Kyoto, 1966) p. 514.
- [7] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ЖЭТФ, **71**, 1542 (1976).
- [8] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ФТТ, **21**, 2342 (1979).
- [9] В.В. Гафийчук, Б.С. Кернер, В.В. Осипов, И.В. Тыллюк. ФТП, **31**, 46 (1989).
- [10] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. ЖЭТФ, **13**, 891 (1979).
- [11] В.В. Гафийчук, Б.С. Кернер, В.В. Осипов, А.Г. Южанин. ФТП, **22**, 2051 (1988).
- [12] И.К. Камилов, А.А. Степуренко, А.С. Ковалев. ФТП, **32**, 697 (1998).
- [13] И.К. Камилов, А.А. Степуренко, А.С. Ковалев. ФТП, **34**, 433 (2000).
- [14] И.К. Камилов, А.А. Степуренко, А.Э. Гумметов. ФТП, **44**, 721 (2010).
- [15] И.К. Камилов, А.А. Степуренко, А.Э. Гумметов, А.С. Ковалев. ФТП, **42**, 393 (2008).
- [16] А.А. Степуренко, К.М. Алиев, Н.С. Абакарова. ФТП, **23**, 1584 (1989).
- [17] А.К. Звездин, В.В. Осипов. ЖЭТФ, **58**, 160 (1970).
- [18] И.К. Камилов, А.А. Степуренко, А.Э. Гумметов. ФТП, **45**, 456 (2011).

Редактор Л.В. Беляков

## Autosolitons in monocrystals of low-resistance indium antimonide and tellurium in magnetic field

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

Institute of Physics,  
Daghestan Science Center,  
Russian Academy of Sciences,  
367003 Makhachkala, Russia

**Abstract** The longitudinal autosolitons, excited by Joule heating under strong electric field of low-resistance samples  $p$ -InSb ( $p \approx 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ) and  $p$ -Te ( $p \approx 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ) are experimentally shown to be insensible to the magnetic field effect. It is caused by a diamagnetism arising at the longitudinal autosoliton owing to pinching. A similar behavior in longitudinal autosoliton reveals in high-resistance samples  $p$ -InSb ( $p \approx 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ) at diamagnetism appearing at  $\theta$ -pinch in an external longitudinal magnetic field.