

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТОКА В МОНОКРИСТАЛЛАХ ВИСМУТА В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

И.Н. Жиляев

Институт проблем технологии микроэлектроники и особых материалов РАН,
142432, Черноголовка Московская обл.,

Поступила в редакцию 13 мая 1992 г.

После переработки 29 мая 1992 г.

Обнаружено, что при пропускании тока в совершенных висмутовых образцах в поперечном магнитном поле при гелиевых температурах возникают монохроматические электромагнитные колебания. Измерения частот колебаний у образцов различных толщин согласуются с моделью неустойчивости, предложенной Азбелем. Наблюдается усиление возбуждаемых в торцевой части образца возмущений.

Изучение, неустойчивостей, наблюдаемых экспериментально, обычно затруднительно и не удастся получить однозначные выводы о их механизмах из-за сложного частотного спектра колебаний ¹. В данной работе наблюдаемая неустойчивость изучается в монохроматической области спектра.

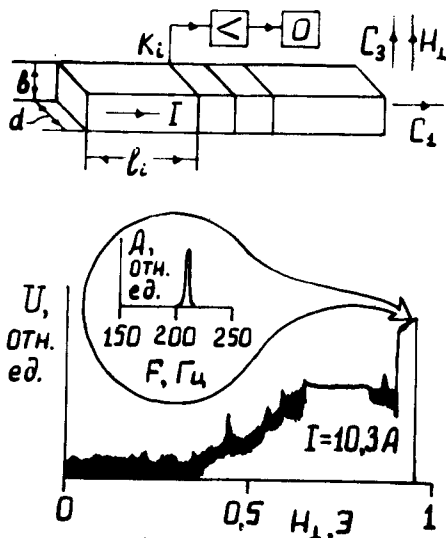


Рис.1.

Геометрия эксперимента приведена на рис.1. Размеры образцов: в поперечном направлении ширина d и толщина b около 1 см, длина около 10 см. Продольная ось образцов параллельна кристаллографической оси C_1 . Температура гелиевой ванны $T = 1,3$ К. В экспериментах использовались совершенные монокристаллы висмута с отношением сопротивлений $\gamma = \rho_{300\text{K}} / \rho_{4,2\text{K}} = 900$, в которых длина пробега носителей заряда сравнима с поперечными размерами образца. При пропускании по образцу тока I величиной несколько ампер и приложении поперечного магнитного поля H_{\perp} около 1 Э параллельно оси C_3 , в образце возникали электромагнитные колебания с частотами от десятков до сотен Гц. Возникшая в катушках ЭДС U усиливалась широкополосным

усилителем и визуально наблюдалась с помощью осциллографа O . На рис.1 приведена типичная зависимость U от величины \vec{H}_\perp при фиксированном I для одного из образцов с $d = 1,5$ см и $b = 0,9$ см, регистрируемая одной из катушек. Наблюдаемые величины U были порядка 10^{-6} В/виток. Область возбуждения неустойчивости можно разделить по частотным характеристикам на участки монохроматических колебаний и полихроматических (на графике зависимости в этой части видны биения различных частот). В круге на рис.1 приведен частотный спектр колебаний полученный анализатором спектра с полосой 3 Гц. Виден монохроматический пик с частотой $F_m = 210$ Гц. Поскольку основное внимание уделялось изучению характеристик монохроматических колебаний, далее речь будет идти только об этой области. Как показали измерения, для данного образца при фиксированных I и \vec{H}_\perp частота и амплитуда колебаний не зависят от положения регистрирующей катушки (за исключением положений возле торцов на расстояниях от торца около величины поперечного размера) и от геометрии тоководов, но являются функциями параметров I и \vec{H}_\perp . Выяснилось также, что F_m и A не меняются с длиной образца, но зависят от поперечных размеров. Неустойчивость с той же частотой можно наблюдать с помощью продольных потенциальных контактов. Колебания напряжения составляют около 10% от постоянного падения напряжения. Измерения проводились в режиме источника тока.

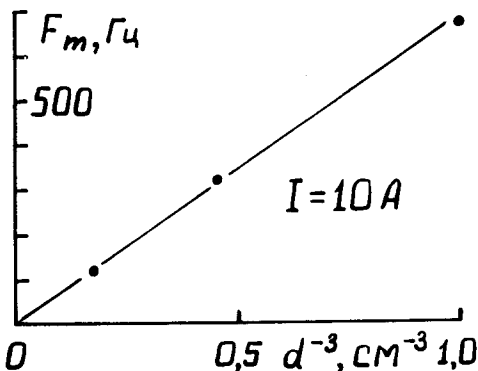


Рис.2

Рис.2. Зависимость частоты неустойчивости от ширины образца при $d \cdot \vec{H}_\perp = 1,2$ см·Э

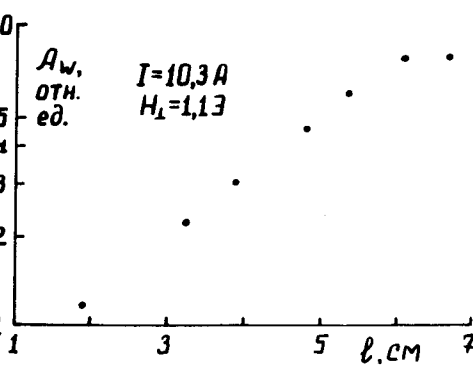


Рис.3

Рис.3. Зависимость амплитуды волны с частотой 210 Гц от ее пробега для образца с $d = 1,5$ см, $b = 0,9$ см

Поскольку в области неустойчивости собственное магнитное поле тока величиной несколько ампер вносит заметный вклад в магнетосопротивление и ток существенно перераспределяется по сечению образца, естественно предположить механизм неустойчивости, предложенный в ² и связанный с колебаниями плотности тока в поперечном сечении проводника. Оценка частот колебаний, которые определяются холловской скоростью и характерным размером порядка размера поперечного сечения дают значения совпадающие по порядку величины с наблюдающимися: в данных экспериментальных условиях, когда холловский угол порядка единицы, холловская скорость должна быть порядка дрейфовой, которая, в свою очередь, при $I \approx 10$ А и плотности носителей заряда 10^{17} см⁻³ имеет характерные значения $\approx 10^2$ см/с. Для проверки соответствия модели наблюдающемуся явлению была измерена зависимость F_m от поперечного сечения образцов. Ввиду того, что поле тока и приложенное

поле сопоставимы по величине, распределение магнитных полей в образце сложным образом зависит от соотношения I , \vec{H}_\perp и геометрических размеров поперечного сечения, что затрудняет интерпретацию результатов. Для того, чтобы обойти эту трудность поперечное сечение образца изменялось подобным образом, а I и \vec{H}_\perp для каждого поперечного сечения подбирались так, чтобы суммарное магнитное поле в образце также менялось в некотором смысле подобно: меньшим размерам поперечного сечения соответствовали пропорционально меньшие орбиты носителей заряда в магнитном поле. В этих условиях зависимость холловской скорости (ответственной за частоту F_m) при изменении d от суммарного магнитного поля в образце пропорциональна $1/d$. Таким образом, чтобы выполнялись условия подобия, при изменении d ток I не менялся, а значение \vec{H}_\perp , при котором измерялась F_m , изменялось пропорционально $1/d$. На рис.2 приведена измеренная зависимость F_m от d (при этом геометрия образцов была такова, что $d = 2b$). Видно, что она хорошо описывается зависимостью $F_m \sim 1/d^3$, что можно объяснить следующим. Холловская скорость пропорциональна тянущему электрическому полю и суммарному поперечному магнитному полю. Электрическое поле при постоянном токе в условиях размерного эффекта пропорционально $1/d$. Суммарное поперечное магнитное поле в силу выбранных условий измерения пропорционально $1/d$. Отсюда, при учете того, что "путь" колебания сокращается пропорционально d , и следует наблюдающаяся зависимость $F_m \sim 1/d^3$.

При отношении длины образца к диаметру около 10, естественно возникает вопрос о синхронизации колебаний в разных частях образца. В связи с этим с помощью двухлучевого осциллографа были проведены измерения фазовых соотношений ЭДС на катушках K_i , из которых следует, что наблюдаемые колебания имеют вид волны, бегущей от плюса источника тока к его минусу (изменение полярности \vec{H}_\perp , в отличие от изменения направления I не влияло на направление волны), с длиной, несколько большей поперечного размера. Это указывает, во-первых, на то, что неустойчивость связана с дырочной частью электронно-дырочной плазмы висмута, то есть синхронизация колебаний в различных частях образца происходит в одном направлении из-за дрейфа дырок в продольном электрическом поле. Во-вторых, в условиях холловского угла около единицы холловская скорость и скорость продольного дрейфа близки друг к другу, что и объясняет близость длины волны к поперечному размеру.

Если в условиях возбуждения неустойчивости, не меняя ток I , увеличить \vec{H}_\perp настолько, что неустойчивость практически не наблюдается, то есть отстроиться по \vec{H}_\perp на несколько процентов выше от начала границы спадания амплитуды неустойчивости (рис.1) и при этом возле торца образца с плюсом источника тока с помощью катушки возбуждать электромагнитные колебания с частотой, близкой к частоте неустойчивости, то катушки K_i также регистрируют электромагнитные колебания. Измерения фазовых соотношений ЭДС на разных катушках дают картину, аналогичную той, что была до отстройки по \vec{H}_\perp . При этом амплитуда колебаний сначала растет экспоненциально по мере удаления от торца образца, а затем стабилизируется при значении равном амплитуде неустойчивости до отстройки (рис.3). Наблюдающееся можно объяснить тем, что при увеличении \vec{H}_\perp начинающееся с небольшого уровня флуктуаций нарастание неустойчивости во времени происходит сравнительно медленно и за время распространения вдоль образца, связанного с дрейфом носителей заряда в продольном электрическом поле, не успевает вырасти до заметного уровня. При возбуждении с помощью катушки колебаний у торца задается сравнительно большая начальная амплитуда колебаний, которая растет экспоненциально со временем. Накладывающийся дрейф носителей

заряда с постоянной скоростью вдоль образца и приводит, по-видимому, к наблюдающейся картине. Если вместо периодических колебаний возле торца образца в тех же условиях задавать возмущающий импульс с шириной около 1 мс, то, как показали измерения ЭДС на разных катушках, наблюдается цуг, состоящий из одного-двух колебаний. Частота колебаний цуга равна частоте неустойчивости. При этом цуг распространяется вдоль образца с постоянной скоростью $2,7 \cdot 10^2$ см/с от плюса источника тока. Амплитуда цуга ведет себя аналогично амплитуде периодического возбуждения. Изменения параметров импульса на величины, сравнимые с величинами самих параметров, не влияло на частоту цуга. Наблюдаемая стабильность частоты цуга связана, по-видимому, с тем, что возбуждаются колебания, соответствующие собственной частоте электромагнитных колебаний в образце, а перемещение цуга с постоянной скоростью связано с дрейфом дырок.

Автор благодарен Долгополову В.Т., Левинсону И.Б. за обсуждения.

-
1. В.Н.Копылов, ФТТ **23**, 1948 (1981); С.И.Захарченко, С.В.Кравченко, Л.М.Фишер, ЖЭТФ **91**, 660 (1986).
 2. М.Я.Азбель, Письма в ЖЭТФ **10**, 550 (1969).