

## МАГНИТОКОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В НЕСОБСТВЕННОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ С СУЩЕСТВЕННО РАЗЛИЧНЫМИ ПОДВИЖНОСТЯМИ ЭЛЕКТРОНОВ И ДЫРОК

*З.С.Грибников, К.Ю.Гуга, Ю.М.Малозовский,  
В.К.Малютенко*

Экспериментально исследованы магнитоконцентрационные эффекты в дырочном антимонопиде индия. Обнаружено сильное магнитное управление током, ограниченное эксклюзией "омическим" контактом, в режиме обогащения и генерация колебаний тока в режиме обеднения.

Обычно предполагают, что магнитоконцентрационный эффект (МКЭ) Велькера [1] и аналогичные ему биполярные анизотропные эффекты (см. обзоры [2, 3]) при термической генерации носителей тока наиболее существенно проявляются в собственных полупроводниках. Это справедливо лишь при близких друг другу значениях подвижностей электронов  $\mu_n$  и дырок  $\mu_p$ ; при сильном их неравенстве указанные эффекты могут быть велики и в существенно несобственных полупроводниках. Например, при  $b = \mu_n / \mu_p \gg 1$ , что имеет место во многих материалах, эти эффекты велики в широком диапазоне равновесных концентраций электронов  $n_0$  и дырок  $p_0$ , определяемом неравенствами

$$b n_0 \gtrsim p_0 \gtrsim n_0, \quad (1)$$

причем оптимум в определенном смысле имеет место именно в сильно несобственном случае, когда  $p_0 \approx b n_0 \gg n_0$ . (Аналогичная ситуа-

ция возникает и в материале с близкими друг другу значениями  $\mu_n$  и  $\mu_p$ , в котором из-за захвата на глубокий уровень можно, например, получить  $b_{eff} = \mu_n \tau_n / \mu_p \tau_p \gg 1$ ; здесь  $\tau_{n,p}$  — времена жизни электронов и дырок, соответственно;  $b_{eff}$  играет роль отношения эффективных подвижностей [4]).

Настоящее сообщение посвящено экспериментальному исследованию МКЭ в дырочном антимолибдате индия с избыточной концентрацией акцепторов  $p_0 - n_0 = N = (2 - 7) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  при температурах 100 — 230 К. Измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ) тонких пластин с толщиной порядка диффузионной длины в поперечных магнитных полях  $H$ , лежащих в плоскости пластины, в импульсном режиме ( $\tau_{имп} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ сек} \gg \tau_n \cong \tau_p = \tau$ ). Применялись различные обработки противоположных поверхностей пластин: механическая, обеспечивающая большие значения скорости рекомбинации  $S^- > 10^5 \text{ см/сек}$ , и химическое травление, дающее  $S^+ \sim 10^3 \text{ см/сек}$  в низкотемпературной части диапазона измерений. Поперечные размеры образцов:  $0,005 \times 0,1 \text{ см}^2$ .

Кроме самой фиксации эффекта в этих условиях мы обращали внимание на два обстоятельства. Во-первых, в отличие от собственного полупроводника в несобственном возникает биполярный дрейф в продольном поле  $E_x$ , так что любое отклонение от равновесия сопровождается затягиваемым вглубь вторичным контактным обогащением или обеднением, которое необходимо выделить. Во-вторых, как показано теоретически в [4], в несобственном случае — в пределах диапазона (1) — при выполнении подходящих условий (одно из которых — однородность в направлении тока) возникают участки отрицательного дифференциального сопротивления  $N$ -типа ( $N$ -ОДС), с которыми могут быть связаны осцилляции тока типа ганновских. Качественно наличие  $N$ -ОДС следует из выражения для поперечных дрейфовых потоков носителей:

$$j_{py} = j_{ny} = a E_x \frac{\mu_p \mu_n p n}{\mu_n n + \mu_p p}, \quad (2)$$

где  $n$  и  $p$  — концентрации электронов и дырок,  $a = \frac{\mu_y^{(n)}}{\mu_{yy}^{(n)}} - \frac{\mu_y^{(p)}}{\mu_{yy}^{(p)}}$  —

параметр анизотропии [2], причем  $\mu_{np} = \mu_{yy}^{(np)}$ . При больших полях  $E_x$  потоки (2) в среднем равны потокам генерации носителей и не зависят от  $n, p$ . При  $n = p$  из (2) следует  $n \approx C / E_x$ , где  $C$  — некоторая константа, и продольный ток  $j_x$ , пропорциональный  $n E_x$ , насыщается. Если же  $bn \gg p \gg n$ , то, согласно (2),  $p \approx C / E_x$ , так что  $n \cong (C / E_x) - N$ , и ток, пропорциональный  $n E_x = C - N E_x$ , убывает.

Эксперимент продемонстрировал сильную температурную зависимость влияния магнитного поля на ВАХ. На рис. 1 построена зависимость отношения тока в магнитном поле  $I_H^+$  к току без магнитного поля  $I_0$  от температуры (индекс + обозначает прямую ветвь ВАХ: магнитное поле отклоняет носители к поверхности с малой  $S = S^+$ ). Резкий максимум этого отношения при  $T = 160 \text{ К}$  легко объяснить, исходя из простой формулы, получаемой для  $S^+ = 0, S^- = \infty$ . Если пренебречь температурной зависимостью всех величин, кроме  $p_0, n_0$ , то форма кри-

вой на рис. 1 определяется дробью

$$\mu_n \mu_p p_0 n_0 / (\mu_n n_0 + \mu_p p_0)^2,$$

максимум которой имеет место при  $p_0 / n_0 = b$ . Из данных на рис. 1 следует  $b \approx 35$ , что приемлемо, учитывая недостаточную точность измерения температуры и знания собственной концентрации  $n_i(T)$ .

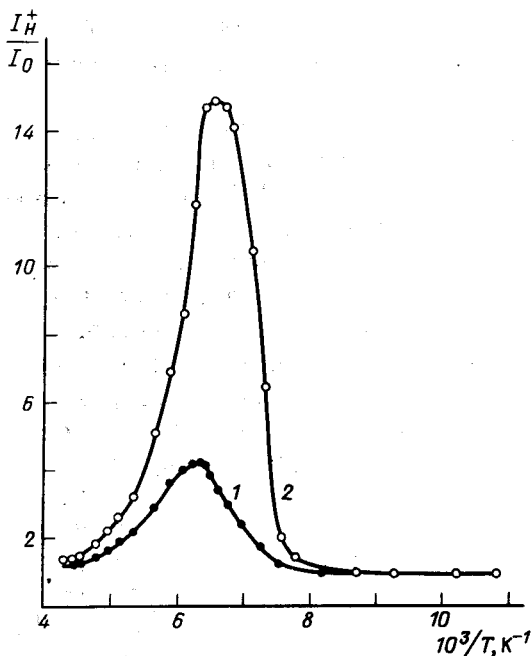


Рис. 1. Зависимость отношения  $I_H^+ / I_0$  от  $T$  в образце с длиной  $l = 0,78$  см,  $N = 7 \cdot 10^{14}$  см $^{-3}$  при  $H = 0,3$  кЭ и  $V = 35$  В (кривая 1) и 80 В (кривая 2)

Из двух кривых на рис. 1 первая отвечает участку ВАХ, где выполняется  $I_H^+ \sim V^2$ , что и следует из теории при  $S^+ = 0$ ,  $S^- = \infty$  и  $\tau = \text{const}$ , а вторая — участку постоянного наклона. Для уточнения природы этих участков, а также, чтобы убедиться, что мы имеем дело с МКЭ на собственных носителях (а не на инжектированных), были измерены ВАХ двух образцов различной длины, представленные на рис. 2 в двух различных масштабах. При малых напряжениях совпадают полевые зависимости тока в образцах, что свидетельствует о "собственном" происхождении МКЭ. При больших напряжениях полевые зависимости расходятся, зато совпадают наклоны зависимостей тока от полного напряжения. Этим полностью исключается инжекционное происхождение ВАХ: поведение при больших напряжениях свидетельствует о локальном обеднении (по-видимому, контактной эксклюзии), ограничивающем рост тока на прямой ветви.

С целью обнаружения  $N$ -ОДС были измерены ВАХ тех же образцов при более высоких температурах, когда  $n_0 \approx N$ . На рис. 3 (кривая 1) построена обратная ветвь ВАХ (отклонение носителей к поверхности с высокой  $S = S^-$ ) при  $T \approx 215$  К, когда  $n_0 \approx 1,2 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ . В широком диапазоне напряжений статическую ВАХ нельзя измерить из-за появления колебаний тока (рис. 3, а). Верхние и нижние значения тока, отсчитанные по экрану осциллографа, построены на рис. 3. Чтобы по-

казать связь наблюдаемых колебаний с теоретически предсказанным  $N$ -ОДС, были измерены зависимости  $I_H^-$  от  $H$  и  $T$ . Обнаружен срыв колебаний вне диапазона магнитных полей  $H = 0,7 - 3 \text{ кЭ}$  ( $T = 215 \text{ К}$ ) и вне температурного интервала  $T = 195 - 230 \text{ К}$  ( $H = 1,3 \text{ кЭ}$ ), что качественно следует теоретическим оценкам.

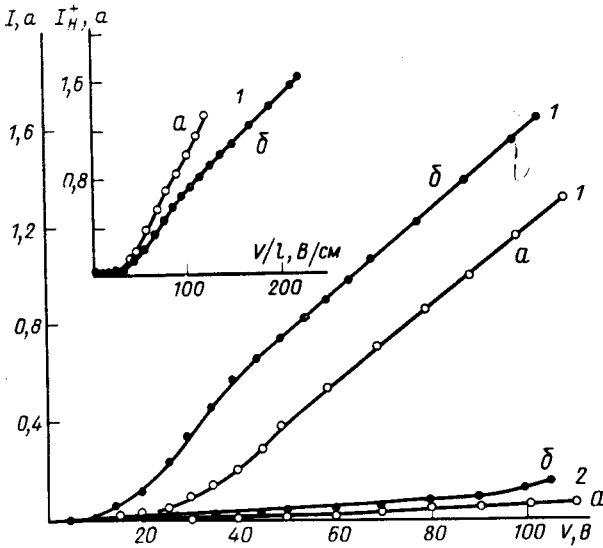


Рис.2. ВАХ двух образцов  $p$ -InSb с  $N = 7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $l = 0,78 \text{ см}$  (кривые  $a$ ) и  $0,4 \text{ см}$  (кривые  $б$ ) при  $T = 160 \text{ К}$  и  $H = 0,5 \text{ кЭ}$  (кривые 1) и 0 (кривые 2)

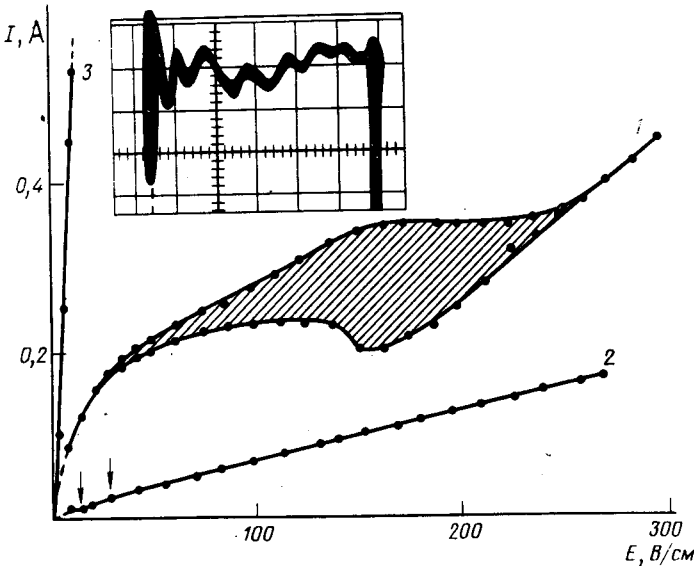


Рис.3. ВАХ. Кривая 1:  $p$ -InSb,  $N = 7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $T = 215 \text{ К}$ ,  $H = 1,5 \text{ кЭ}$ ; заштрихована область осцилляций. Кривая 2:  $n$ -InSb,  $N = -2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $T = 205 \text{ К}$ ,  $H = 9 \text{ кЭ}$ ; стрелками указаны границы области осцилляций. Кривая 3: тот же образец, что на кривой 1, при  $H = 0$ ;  $a$  — осциллограмма колебаний тока в образце  $p$ -InSb при  $E_x = 150 \text{ В/см}$ ; масштаб по горизонтали  $1 \text{ см} - 10^{-8} \text{ сек}$

С ростом магнитного поля из-за быстрого замагничивания электронов  $b(H)$  резко уменьшается и при  $H \approx 3,5 - 4$  кЭ становится меньше единицы. При этом следует ожидать  $N$ -ОДС в электронном, а не дырочном материале. Измерения, выполненные в  $n$ - $\text{InSb}$ , также обнаружили участки ВАХ с осцилляциями (рис.3, кривая 2), амплитуда, которых и интервал существования по напряжению были существенно меньше, чем в образцах  $p$ -типа. Можно думать, что предсказываемая теорией [4] ВАХ с  $N$ -ОДП является причиной неустойчивости состояния, однородного вдоль направления тока, и это приводит к наблюдаемым колебаниям.

Институт полупроводников  
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию  
22 января 1979 г.

### Литература

- [1] H. Welker. Z. für Naturforsch., 6A, 184, 1951.  
[2] Э.И.Рашба, З.С.Грибников, В.Я.Кравченко. УФН, 119, 3, 1976.  
[3] И.И.Бойко, В.А.Романов. ФТП, 11, 817, 1977.  
[4] З.С.Грибников. ФТП, 9, 1740, 1975.
-