

- [1] Хлудков С. С. // Изв. вузов. Физика. 1983. Т. 26. В. 10. С. 67—78.  
 [2] Белобородов П. Ю., Толбанов О. П., Хлудков С. С. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 4. С. 755—759.  
 [3] Хлудков С. С. // VI Всес. совещ. по исследованию арсенида галлия. Сб. трудов. Томск, 1987. Т. 1. С. 30—31.  
 [4] Хлудков С. С., Толбанов О. П. // Тр. II Всес. школы-семинара. Саратов, 1988. Т. 4. В. 11. С. 3—4.  
 [5] Clorfeine A. S., Ikola R. J., Napoli L. S. // RCA Rev. 1969. V. 30. N 3. P. 397—421.  
 [6] De Loach B. C., Scharfotter D. L. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1970. V. ED-17. N 1. P. 9—21.  
 [7] Грехов И. В., Кардо-Сысоев А. Ф., Костина А. С. // Письма ЖТФ. 1979. Т. 5. В. 15. С. 950—953.  
 [8] Хлудков С. С., Толбанов О. П., Лахтикова В. Г. // Радиотехн. и электрон. 1973. Т. 18. В. 9. С. 1893—1899.  
 [9] Толбанов О. П., Хлудков С. С. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 11. С. 2072—2077.

Сибирский физико-технический институт  
им. В. Д. Кузнецова при ТГУ  
Томск

Получено 17.07.1991  
Принято к печати 24.07.1991

*ФТП, том 26, вып. 2, 1992*

## КОНТАКТНАЯ ЭКСКЛЮЗИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ С АНИЗОТРОПНОЙ БИПОЛЯРНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

Акопян А. А., Витусевич С. А., Гуга К. Ю.,  
Малютенко В. К., Рыбак А. М.

1. Явление контактной эксклюзии — неравновесное истощение области полупроводника, прилегающей к антизапорному контакту, вследствие продольного дрейфа электронно-дырочных пар к другому контакту — к настоящему времени хорошо изучено (см. обзоры [1, 2]). Исследованы пространственное распределение носителей заряда [3-7], влияние поперечных размеров кристалла и состояния поверхности [8] на вольт-амперные характеристики (ВАХ) и кинетику установления тока [4], имеются предложения по практическому использованию явления [9]. Однако все эти исследования эффекта проводились в полупроводниках с изотропной проводимостью, когда в образце нет потоков носителей заряда, перпендикулярных к направлению приложенного электрического поля. В полупроводниках же с анизотропной проводимостью роль потоков носителей, перпендикулярных к направлению приложенного электрического поля, особенно велика в образцах, ограниченных в направлении таких поперечных потоков. В этих условиях в биполярных полупроводниках возникают интересные эффекты, сильно зависящие от скоростей поверхностной рекомбинации на ограничивающих образец гранях [10]. В образцах с омическими контактами в случае анизотропии, наведенной приложением одноосного сжатия, наблюдался тензоконцентрационный эффект [11]. Если же анизотропия создана приложением скрещенного с электрическим магнитного поля, эффект носит название магнитоконцентрационного [12]. Заметим, что в случае омических контактов распределение носителей заряда вдоль направления электрического тока однородно, а неоднородность распределения имеется только в поперечном току направлении и сильно зависит от скоростей поверхностной рекомбинации на боковых гранях образца. В образце, ограниченном инъекти-

рующими контактами, а также с поперечной неоднородностью распределения носителей заряда имеется также и продольная неоднородность распределения носителей. Соответствующие эффекты в этом случае носят названия тензодиодного и магнитодиодного [13, 14].

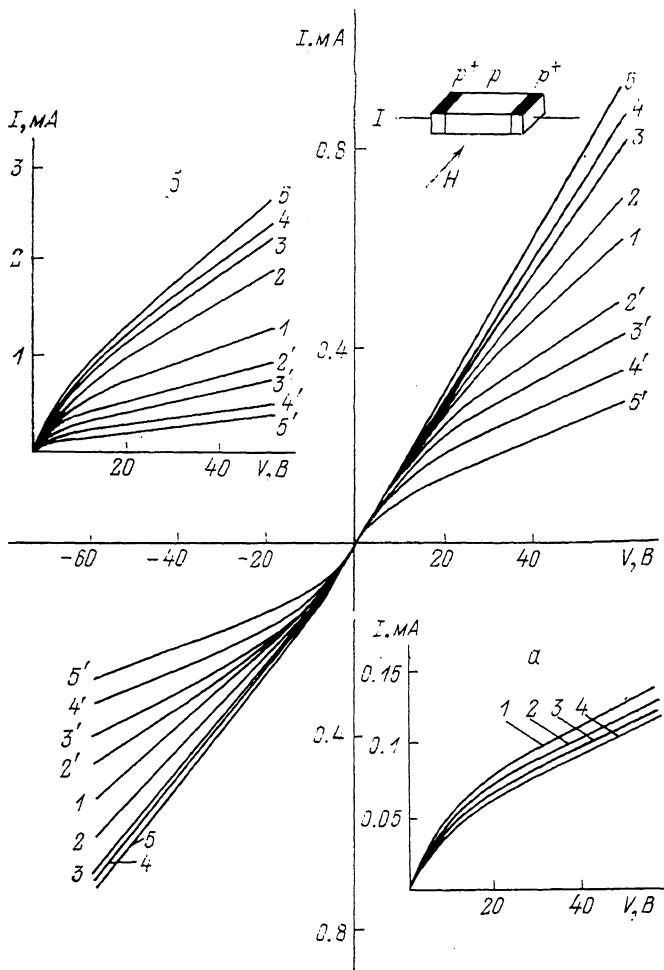
2. В данном сообщении мы приводим первые предварительные результаты изучения прохождения тока через образец с антизапорными контактами, анизотропия в котором создается магнитным полем или одноосным сжатием. Таким образом, мы исследуем влияние анизотропии на эффект контактной эксклюзии, создающий резко неоднородное распределение носителей заряда вдоль направления протекания тока.

Эффект исследовался при комнатной температуре на образцах  $p$ -Ge с концентрацией нескомпенсированной примеси  $2 \cdot 10^{11}$  и  $5 \cdot 10^{11}$   $\text{см}^{-3}$ . Антизапорные контакты изготавливались сплавлением индия в травленную в перекиси водорода поверхность торца образца. Грани образца после обработки его в перекиси водорода имели скорость поверхностной рекомбинации  $S_{\min} \approx 50-100$   $\text{см/с}$ , одна из граней после этого шлифовалась, что приводило к повышению на ней скорости поверхностной рекомбинации примерно до  $S_{\max} \approx 10^4$   $\text{см/с}$ . В некоторых образцах шлифовка не проводилась. Для экспериментов с одноосным сжатием образцы из  $p$ -Ge с концентрацией доноров  $5 \cdot 10^{11}$   $\text{см}^{-3}$  резались в виде пластин в направлении  $29^\circ$  к оси [111]. Напряжение на образец подавалось в виде импульсов длительностью от 100 до 500 мкс. ВАХ образцов регистрировались самописцем. Полученные результаты показывают, что поперечный вынос носителей на боковые грани образца сильно влияет на ВАХ образца. Как известно [3], ВАХ при контактной эксклюзии имеет характерную зависимость тока  $I$  от напряжения  $V$ :  $I \sim \sqrt{V}$ . Почти для всех наших экспериментальных кривых такая зависимость имела место. В некоторых случаях ВАХ имели вид, характерный для магнитоконцентрационного или тензоконцентрационного эффекта. Для этих эффектов имеет место следующая физическая картина. Если скорости поверхностной рекомбинации на обеих гранях равны и близки к нулю ( $S_1 = S_2 = 0$ ), то перераспределение концентрации электронно-дырочных пар в поперечном току направлении не приводит к изменению их полного числа и изменению ВАХ. Однако положение существенно меняется при несимметричной обработке граней образца ( $S_1 = S_{\max}$ ;  $S_2 = S_{\min}$ ). При выносе электронно-дырочных пар на грань с  $S_{\min}$ , возникающем из-за анизотропии, образец в целом обогащается электронно-дырочными парами. Грань с  $S_{\max}$  становится эффективным генератором пар, а у грани  $S_{\min}$  накапливается слой с концентрацией пар, превышающей равновесную. ВАХ образца в зависимости от преобладающего в слое обогащения закона рекомбинации может быть как линейной, так и сверхлинейной.

При выносе пар на грань  $S_{\max}$  большая часть образца обеднена парами, а у грани  $S_{\max}$  образуется узкий (много уже диффузионной длины) слой обогащения, не вносящий существенного вклада в общий ток через образец. ВАХ образца в основном определяется истощенной его областью и имеет характерную область насыщения тока. Ясно, что поперечные потоки носителей более сильно изменяют ВАХ в более тонких образцах.

При явлении контактной эксклюзии в образце вдоль направления протекания тока образуется резко неоднородное распределение пар [3]. В приконтактной области образуется расширяющаяся с ростом напряжения область сильного обеднения образца. Концентрация электронно-дырочных пар в ней (если нет генерации с граней образца) настолько низка, что поперечный вынос носителей не играет роли. Почти вся остальная часть образца занята равновесной плазмой и в ней поперечный вынос может играть существенную роль, однако ВАХ образца в основном определяется истощенной приконтактной областью.

Изложенные физические соображения помогают понять полученные результаты изучения эффекта эксклюзии в образце с анизотропной проводимостью.



Вольт-амперные характеристики  $p^+-p-p^+$ -структуры (квадранты I и III) ( $N_A-N_D = 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ) с тонкой базой и асимметричной обработкой противоположных граней ( $S_1 > S_2$ ) в различных магнитных полях.

$H$ , кГс: 1 — 0, 2, 2' — 1, 3, 3' — 2, 4, 4' — 4, 5, 5' — 9; 2-5 — вынос пар к грани с  $S_2$ , 2'-5' — вынос пар к грани с  $S_1$ . На вставке  $a$  — вольт-амперные характеристики той же структуры при симметричной обработке граней ( $S_1 = S_2$ ) в магнитных полях различной направленности  $H$ , кГс: 1 — 0, 2 —  $\pm 4$ , 3 —  $\pm 6$ , 4 —  $\pm 9$ . На вставке  $b$  — вольт-амперные характеристики  $p^+-p-p^+$ -структуры ( $N_A-N_D = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ) с толстой базой с асимметричными обработками поверхностей ( $S_1 > S_2$ ) в различных магнитных полях  $H$ , кГс: 1 — 0, 2, 2' — 1, 3, 3' — 2, 4, 4' — 5, 5, 5' — 9.

На рисунке (квадранты I и III) представлены ВАХ  $p^+-p-p^+$ -структуры (размеры образца  $10 \times 4 \times 1.5 \text{ мм}$ ) с концентрацией акцепторов в  $p$ -базе  $5 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . Рисунки в квадрантах I и III отличаются направлением приложенного электрического поля так, что эксклюзия происходит от различных контактов. Результаты демонстрируют различие качества этих контактов. ВАХ сняты без магнитного поля (кривая 1) и с различным направлением магнитного поля; при этом электронно-дырочные пары выносятся как на грань с  $S_{\text{min}}$ , так и на грань с  $S_{\text{max}}$ . Большинство ВАХ имеют вид, описываемый зависимостью  $I \sim \sqrt{V}$ . Поперечный вынос носителей, рожденных на грани с высокой скоростью генерации, в область эксклюзионного истощения приводит к повышению в ней концентрации электронно-дырочных пар и к повышению тока через структуру.

При очень сильных магнитных полях (кривые 4, 5) потоки носителей, рожденные на грани с высокой скоростью генерации, настолько интенсивны, что повышают концентрацию пар носителей в истощенной области почти до равновесной, а ВАХ становится почти линейной (кривая 5).

При противоположном направлении магнитного поля происходят вынос пар на грань с  $S_{\max}$  и понижение концентрации пар в образце. Оно происходит как в области эксклюзионного истощения, не полного без магнитного поля из-за диффузионного потока носителей, рожденных на грани с высокой скоростью генерации носителей [8], так и в области, не затронутой эксклюзией. Снос пар в магнитном поле противоположен их диффузионному потоку от грани с высокой скоростью их генерации и подавляет его. Это приводит к понижению тока по сравнению с ВАХ без магнитного поля. В этом случае ВАХ опять имеют характерный для эксклюзии вид:  $I \sim \sqrt{V}$ . В образцах с более низкой концентрацией примеси ( $2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ) и более тонких (1 мм) при сильных магнитных полях мы наблюдали полное подавление эксклюзии поперечным выносом пар и ВАХ с насыщением тока, характерные для магнитоконцентрационного эффекта. Эти результаты будут опубликованы в другом сообщении.

На вставке (а) представлены ВАХ того же образца, когда грани обладали одинаковыми и минимальными скоростями поверхностной генерации-рекомбинации ( $S_1 = S_2 = S_{\min}$ ). Видно, что в этом случае влияние магнитного поля на ВАХ минимально, не зависит от его направления и определяется обычным магнитосопротивлением, так как ВАХ, представленные кривыми 2—4, получены при двух противоположно направленных магнитных полях и совпадают.

На вставке (б) представлены результаты исследования образцов, более толстых в поперечном к току направлении (размером  $13 \times 4 \times 3$  мм). Видно, что в этом случае поперечные потоки, рожденные на гранях образца, играют меньшую роль, и ВАХ имеют вид, характерный для эксклюзионных, и не наблюдаются ВАХ, приближающиеся к таковым для магнитоконцентрационного эффекта.

Результаты, аналогичные изложенным, были получены также в случае анизотропной проводимости, вызванной одноосным сжатием кристаллов. Образцы подвергались давлению вдоль направления приложенного поля, а направление выноса пар выбиралось путем изменения направления электрического поля. Поэтому случаи обеднения и обогащения исследовались при эксклюзии от разных  $p^+$ -контактов образца. Полученные результаты показали, что управление ВАХ образцов с помощью одноосного сжатия слабее, чем при управлении магнитным полем, но основные закономерности управления ВАХ в этом случае сохраняются.

#### Список литературы

- [1] Aronov D. A., Knigin P. J., Korolev Ju. S., Rubinov V. U. // Phys. St. Sol. (a). 1984. V. 81. N 1. P. 11—45.
- [2] Pultorak J. // Phys. St. Sol. (a). 1984. V. 82. N 1. P. 11—22.
- [3] Акоюян А. А., Витусевич С. А., Малютенко В. К. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 10. С. 1783—1788.
- [4] Акоюян А. А., Витусевич С. А., Малютенко В. К. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 3. С. 471—478.
- [5] Акоюян А. А., Витусевич С. А., Малютенко В. К. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 8. С. 1424—1426.
- [6] Атабаева А. Н., Рубинов В. В. // Изв. АН Уз. ССР. Сер. физ.-мат. наук. 1989. № 2. С. 81—83.
- [7] White A. M. // Infr. Phys. 1985. V. 25. N 6. P. 729—741.
- [8] Витусевич С. А., Малютенко В. К., Малозовский Ю. М. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 3. С. 471—478.
- [9] Малютенко В. К., Рыбак А. М., Коллюх А. Г. // ЖПС. 1987. Т. 47. В. 2. С. 299—301.
- [10] Рашба Э. И., Грибников З. С., Кравченко В. Я. // УФН. 1976. Т. 119. В. 1. С. 3—47.