

©1994 г.

ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР СФЕРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ С АНТИЗАПОРНЫМИ КОНТАКТАМИ

А.А.Акопян, В.К.Малютенко, Г.И.Тесленко

Институт физики полупроводников Академии наук Украины,
252650, Киев, Украина
(Получена 30 июля 1993 г. Принята к печати 19 января 1994 г.)

Неоднородное электрическое поле в кристаллах сферической симметрии приводит к качественно новым особенностям эксклюзии. Вольт-амперные характеристики симметричных структур типа $p^+ - p - p^+$ становятся несимметричными. При эксклюзии от периферии сферы к ее центру на вольт-амперной характеристике формируется параболический участок вида $i \sim V^2$, обусловленный значительной аккумуляцией носителей в окрестности малого радиуса. При эксклюзии от центрального контакта длина области с пониженной концентрацией носителей L_e аномально слабо зависит от величины тока ($L_e \sim i^{1/3}$). Объект исследований — германий с собственной проводимостью при температуре измерений $T > 225$ К.

1. Явление контактной эксклюзии в электрическом поле, пространственно неоднородном еще до обусловленного этим эффектом перераспределения концентрации плазмы по образцу, изучалось нами недавно для образцов цилиндрической геометрии [1,2]. Было показано, что исходная неоднородность поля ($E \sim r^{-1}$) может привести к качественным изменениям характеристик эксклюзии: изменению вольт-амперной характеристика (ВАХ) и зависимости длины эксклюзии от тока. В настоящем сообщении мы покажем, что еще более сильная неоднородность поля ($E \sim r^{-2}$), связанная со сферической геометрией образца, может привести к еще более существенным изменениям функциональных зависимостей, характеризующих эффект, по сравнению с таковыми для образцов прямоугольной геометрии. Кроме того, по-видимому, впервые обнаружен случай, когда аккумуляционный слой около одного из контактов изменяет вид ВАХ образца.

2. Рассмотрим эффект контактной эксклюзии в полупроводниковом образце сферической геометрии с антизапорными контактами, нанесенными на внутреннюю и внешнюю сферические поверхности с радиусами соответственно R_1 и R_2 . В условиях, когда подвижности μ

коэффициенты диффузии D для электронов и дырок одинаковы и выполнено условие квазинейтральности, уравнение непрерывности для p -полупроводника ($p = n + n_e$) имеет вид

$$\frac{D}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dn}{dr} \right) + \frac{Fn_e}{r^2(2n + n_e)^2} \frac{dn}{dr} = \frac{n - n_0}{\tau}, \quad (1)$$

где n_e — концентрация ионизованных акцепторов, τ — время жизни носителей, $F = r^2(j_p - j_n)$ — полный ток через образец, $j_{n,p}$ — потоки электронов и дырок. Решение уравнения (1) выполнено по методике, описанной в работе [2].

Будем рассматривать эксклюзию как в «чистых» полупроводниках, т.е. при выполнении условия $n_0/n_e \gg 1$, где n_0 — равновесная концентрация электронов, так и в «длинных» образцах, когда $R_2 - R_1 \gg L$, где L — биполярная диффузионная длина. Первым рассмотрим случай эксклюзии от внутреннего радиуса сферы R_1 , когда в области обеднения электрическое поле особенно велико. Это обстоятельство обусловлено как приконтактным эксклюзионным обеднением, так и пространственной зависимостью напряженности электрического поля E от радиуса r в сферической геометрии: $E \sim r^{-2}$. В этом случае при $R_1 \gtrsim L$ высокий уровень эксклюзии начинается при тех же плотностях тока, измеренных на внутренней поверхности сферы, что и в цилиндрической [1,2] и прямоугольной [3] геометрии образца, однако ВАХ оказывается строго линейной в своем главном слагаемом

$$V \approx \frac{F}{\mu R_1 n_e}. \quad (2)$$

Длина эксклюзии L_e следующим образом зависит от тока F :

$$L_e \approx \left(\frac{3F\tau}{2n_e} \right)^{1/3}. \quad (3)$$

Интересно, что начальный линейный участок на ВАХ, соответствующий низкому уровню эксклюзии, может не наблюдаться, так как даже незначительное уменьшение концентрации носителей вблизи R_1 (в области самого сильного поля) сразу обуславливает сублинейность ВАХ.

При эксклюзии от внешнего контакта картина высокого уровня эксклюзии в окрестности $r = R_2$ качественно не отличается от таковой для эксклюзии в прямоугольной геометрии ($i \sim V^{1/2}$). Однако из-за малости напряженности электрического поля около R_2 высокий уровень эксклюзии наступает при более высоком значении полного тока через образец. При этом интересное явление возникает еще при низком уровне эксклюзии, когда обеднение около контакта на внешней поверхности сферы мало. Около внутреннего контакта, где напряженность поля велика, возникает аккумуляционный слой, который настолько существен в этом случае, что влияет на форму ВАХ.

Рассматривая решение (1) около внутреннего контакта, находим, что распределение концентрации здесь имеет вид

$$n = n_0 \left\{ 1 + \frac{F\tau \exp[(R_1 - r)/L]}{2n_e L r (R_1 + L)} \right\}. \quad (4)$$

Слой аккумуляции отделяется от остального объема образца слоем со скачком концентрации, ширина которого много меньше диффузионной длины. Ширина аккумуляционного слоя L_a есть

$$L_a \approx \frac{1}{2n_0} \sqrt{\frac{\tau F n_e}{L}} \quad (5)$$

при $F < \frac{n_0^2 L^3}{n_e \tau}$. Если при этом в образце сохраняется низкий уровень эксклюзии около внешнего контакта, то ВАХ образца имеет вид

$$F \approx \frac{\tau n_e \mu^2}{L} V^2. \quad (6)$$

Таким образом, после начального омического участка, соответствующего низкому уровню эксклюзии вблизи R_2 и незначительной аккумуляции носителей в окрестности R_1 , на ВАХ возникает переходный сверхлинейный участок (6), соответствующий высокому уровню аккумуляции ($n > n_0$) у контакта R_1 при низком уровне эксклюзии около контакта на внешней сфере. С ростом тока в образце формируется высокий уровень эксклюзии, и ток в нем становится пропорциональным корню квадратному из напряжения.

3. Эксперимент выполнялся на образцах полусферической формы со внешним радиусом сферы $R_2 = 3$ мм, внутренним $R_1 = 0.5$ мм (см. вставку к рис. 1). Материал — германий с собственной проводимостью при температуре измерений $N_a - N_d = 8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$; $p^+ - p$ -контакты формировались вплавлением индия на внешнюю и внутреннюю поверхности полусферы. Измерения ВАХ при малых напряжениях ($V \leq 1$ В) проводились на постоянном токе, при больших напряжениях — в импульсном режиме, длительность импульса ≤ 1 мс, что позволяло избежать нагрева образца и в то же время регистрировать стационарные характеристики.

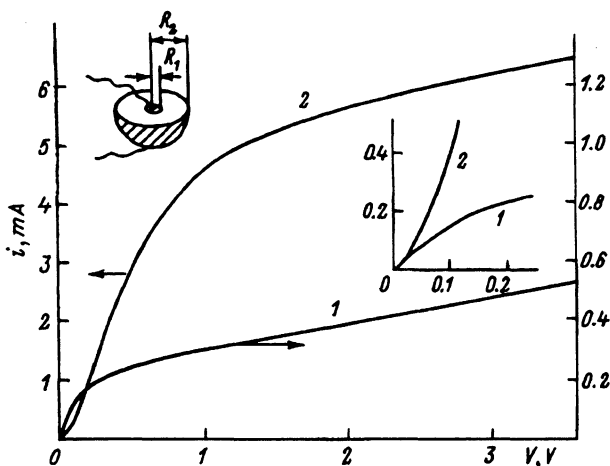


Рис. 1. Вольтамперные характеристики сферического образца германия с антизапорными контактами при $T = 290$ К.

1 — эксклюзия от центрального контакта, 2 — эксклюзия от периферического контакта и аккумуляция в центре. На вставке — начальные участки ВАХ в едином масштабе.

На рис. 1 представлены стационарные ВАХ при эксклюзии от центра (кривая 1) и от периферии (кривая 2). Обращаем внимание, что эти кривые изображены в разных масштабах по оси токов. На вставке показаны в едином масштабе начальные участки ВАХ. Из рисунка видно, что, как и ожидалось, протяженность первого омического участка ВАХ чрезвычайно мала и уже при напряжении 0.01 В ветви ВАХ расходятся. При эксклюзии от центра на ВАХ возникает сублинейный участок, характерный для перехода от низкого уровня эксклюзии к высокому, и далее с ростом V он сменяется линейным участком, характерным для высокого уровня эксклюзии.

При эксклюзии от периферии хорошо виден сверхлинейный рост тока. Предсказанной теорией квадратичной зависимости тока от напряжения мы не наблюдали: имеет место закон нарастания тока от напряжения с показателем степени ~ 1.6 . По всей видимости, это связано с тем, что в наших образцах размер $R_2 - R_1$ незначительно превышает диффузионную длину и сравнение с теорией становится не вполне корректным. Сверхлинейный участок ВАХ с ростом V сменяется стандартной корневой зависимостью. Оценим приближенно, используя формулу (4), приконтактную концентрацию носителей тока в слое аккумуляции. Оказывается, что десятикратное превышение концентрации n/n_0 при $r = R_1$ имеет место уже при $V = 5$ мВ. При $V = 40$ мВ следует ожидать увеличения концентрации на 2 порядка. Разумеется, сказанное справедливо для линейной рекомбинации. Не принято во внимание также указанное выше несовпадение в законах нарастания тока при эксперименте и в теории. Тем не менее аномально низкие значения напряжений, при которых имеет место столь сильная модуляция концентрации носителей тока, впечатляют.

Дополнительным свидетельством значительной аккумуляции носителей может служить рис. 2, где представлены ВАХ того же образца при пониженной температуре (225 К), когда полная проводимость образца становится примесной ($n_i = 10^{11} \text{ см}^{-3} < n_e$). В кристаллах, изготовленных в виде параллелепипедов, контактная эксклюзия, как известно, в таких условиях на ВАХ не проявляется, они остаются омическими в негреющих электрических полях. Линейной остается ВАХ и в образце-сфере при эксклюзии из центра. Однако даже несущественная казалась бы, на первый взгляд, эксклюзия электронов и дырок из периферической части образца и их аккумуляция в центре сферы (при

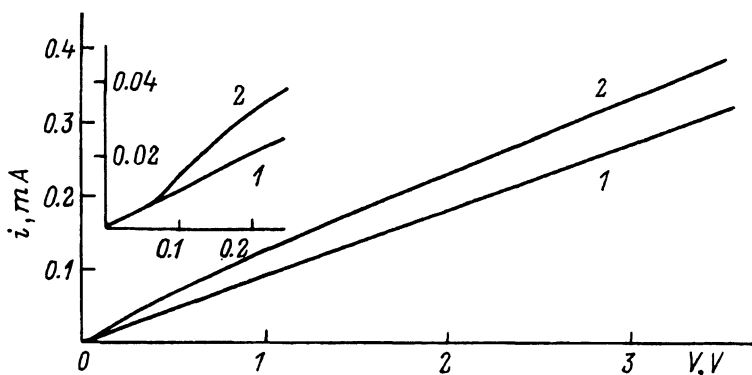


Рис. 2. То же, что на рис. 1, при температуре $T = 225$ К.

перемене знака напряжения) проявляется характерным сверхлинейным участком ВАХ (высокий уровень аккумуляции, $n > n_e$) при малых напряжениях.

Список литературы

- [1] А.А.Акопян, В.К.Малютенко. Письма ЖТФ, **18**, 1 (1992).
- [2] А.А.Акопян, В.К.Малютенко, С.А.Витусевич. ФТП, **28**, 21 (1994).
- [3] А.А.Акопян, С.А.Витусевич, В.К.Малютенко. ФТП, **21**, 1783 (1987).

Редактор Т.А.Полянская
