

НОВЫЙ МЕХАНИЗМ ТОКОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В УЗКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

А.А.Акопян, С.С.Болгов, В.К.Малютенко, А.П.Савченко

Экспериментально и теоретически исследован новый эффект токовой неустойчивости и генерации колебаний при магнитоконцентрационном эффекте (МКЭ) в узкозонном полупроводнике в условиях преобладания оже-процессов.

В литературе описан лишь один механизм образования N -образной вольтамперной характеристики (ВАХ) при МКЭ, связанный с несобственностью полупроводника¹⁻³. Для его проявления необходимо сильное различие во временах жизни носителей и / или в подвижностях электронов и дырок, а также независимость темпа генерации носителей от их концентрации. Этот механизм наблюдался в InSb^{2,3} при температурах 195 – 220 К; в цепи с образцом возникали колебания тока, причем максимально наблюдаемая удвоенная амплитуда колебаний достигала 20 % от среднего значения тока.

В настоящем сообщении описан эффект неустойчивости тока в пленках $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ при МКЭ в диапазоне температур 300 – 380 К, когда объемная генерация и рекомбинация носителей обусловлены оже-процессами.

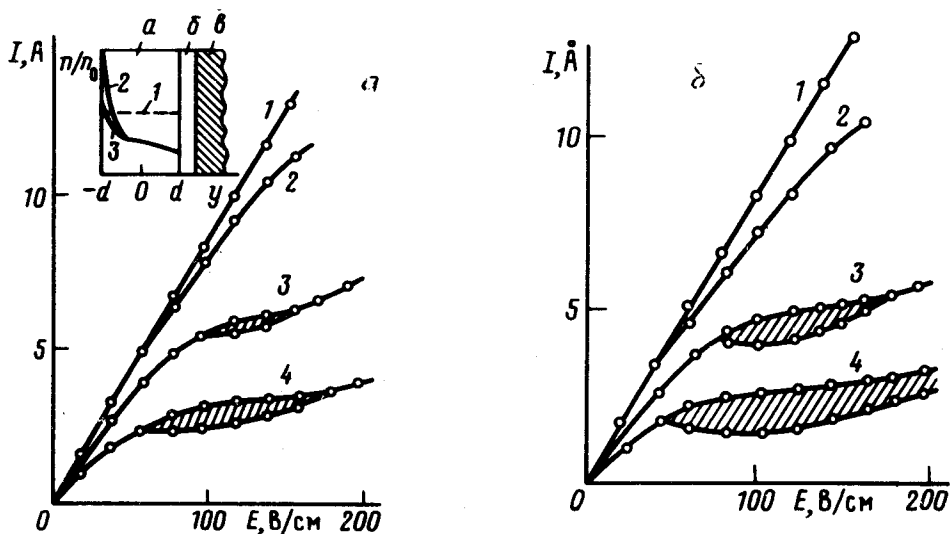
Удвоенная амплитуда колебаний тока в некоторых случаях достигала 50 % величины среднего тока, протекающего через образец. Причиной образования N -образной ВАХ в этих условиях является уменьшение темпа оже-генерации носителей при истощении полупроводника электронно-дырочными парами. Так как для МКЭ характерно наличие в образце обширной обедненной области, в которой преобладает генерация, и если она, а не узкий обогащенный слой определяет ВАХ образца, то при преобладании оже-генерации в истощенной области ВАХ может иметь участок N -образия. Этот механизм образования N -ОДП на ВАХ не связан с несобственностью полупроводника, хотя работает и в несобственных полупроводниках, он также не требует сильного неравенства между временами жизни или подвижностями носителей, однако проявляется и при наличии таких неравенств.

В условиях развитого МКЭ образец разбивается на две области: область обогащения электронно-дырочными парами, называемую пинч-слоем, имеющую толщину много меньше биполярной диффузионной длины и прилегающую к одной из граней образца, и область обеднения, занимающую весь остальной объем образца. Область обеднения в образце имеется всегда, за исключением случая, когда скорость поверхностной генерации s^- на грани, от которой уносятся пары, равна бесконечности. На вставке к рис. 1а показан качественный ход концентрации электронно-дырочных пар в образце при различных скоростях поверхностной рекомбинации на грани, к которой пары сносятся.

Рассмотрим только область истощения, полагая, что скорость поверхностной рекомбинации s^- настолько велика, что ток образца, в основном, определяется истощенной областью. Будем считать приложенное поле настолько сильным, что процессы в истощенной области описываются в дрейфовом приближении, то есть без учета диффузии. Предполагаем для простоты, что образец чисто собственный и член генерации – рекомбинации имеет вид: $-\frac{n^3 - n_0^2 n}{\tau_A n_0^2}$, где n – концентрация электронов, n_0 – их равновесная концентрация, τ_A – время жизни при оже-процессе. Тогда уравнение непрерывности для истощенной области имеет вид³

$$\frac{2D\gamma}{L} \frac{dn}{dy} = \frac{n^3 - n_0^2 n}{\tau_A n_0^2}, \quad (1)$$

где D — амбиполярный коэффициент диффузии, y — координата, поперечная к току, текущему в направлении x ($-d \leq y \leq d$, образец выбран в виде пластины, бесконечной в направлениях x и z). $L^2 = D\tau_A$, γ — безразмерное поле, приложенное к образцу: $\gamma = eaE_x L/4kT$, где a — коэффициент анизотропии³, E_x — поле, приложенное вдоль оси x .



Вольтамперные характеристики эпитаксиальных пленок $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$. H , кЭ: 1 — 0; 2 — 5; 3 — 10; 4 — 20; $a - s^- \approx 10^4$ см/с, $b - s^- \approx 5 \cdot 10^5$ см/с. На вставке: профиль распределения концентрации носителей заряда по сечению гомозонного слоя пленки $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$: a — гомозонный слой пленки, b — переходной слой, c — подложка из $CdTe$; 1 — равновесное распределение носителей заряда, 2 — s^- на поверхности — d мала, 3 — s^- на поверхности — d велика

В правой части (1) можно дописать члены, связанные с квадратичной $(n^2 - n_0^2)/n_0\tau_R$ и линейной $(n - n_0)/\tau_0$ рекомбинациями; эти генерационные законы дают поток носителей в истощенной области, не зависящий от электрического поля, что приводит к участку насыщения тока на ВАХ. Оже-генерация уменьшается с ростом электрического поля из-за уменьшения концентрации носителей с ростом поля. Поэтому на ВАХ появляется участок N -ОДП при доминировании процессов оже-генерации, для выполнения чего необходимы неравенства $\tau_A \ll \tau_0, \tau_R$. Решение (1) с обычным граничным условием на грани $y = +d$, имеющей скорость поверхностной генерации S^+ , дает для ВАХ образца следующие результаты. При $\gamma \rightarrow 0$ ВАХ омическая, ток i пропорционален $2\delta\gamma$, где $\delta = d/L$, с ростом γ рост тока замедляется и достигает максимума при значении $\gamma_{max} \approx S^+$, где $S^+ = s^+L/D$ при $S^+ \gg \delta$ и $\gamma_{max} \approx \delta / (\ln \frac{2\delta}{S^+} - \ln \ln \frac{2\delta}{S^+})$, если $S^+ \ll \delta$. При $\gamma \gg \gamma_{max}$

$$i \sim S^+ \gamma \left(\frac{\exp(\delta/\gamma)}{(1 + S^+/\gamma)^{1/2}} - \frac{1}{1 + S^+/2\gamma} \right). \quad (2)$$

Формула (2) демонстрирует основной эффект — спадание i с ростом γ с выходом на насыщенное значение δ . Конечно, формула типа (2) не может в точности описать ВАХ, наблюдаемую на эксперименте, так как при сильном истощении образца вступают в игру и другие механизмы генерации носителей. Ток (2) пропорционален S^+ , что показывает необ-

ходимость потока носителей, рожденных на грани $y = +d$, для вычисления эффекта в дрейфовом приближении. Дрейфовое приближение пригодно при $\gamma \gg 1$. Формула типа (2) получается при неравенстве вида $S^+ > \gamma$, что будет показано впоследствии в более обширной публикации. При $S^+ = 0$ эффект N -ОДП, по-видимому, имеет место при $\gamma < 1$, когда дрейфовое приближение неприменимо. Однако для наблюдения эффекта необходимо использовать образцы с малыми S^+ , так как увеличение S^+ сдвигает область N -ОДП в область сильных электрических полей, где ОДП может маскироваться эффектами разогрева носителей и ударной ионизацией¹⁾.

Для изучения МКЭ в образцах с малыми S^+ нами впервые при исследовании МКЭ была использована гетероструктура изоморфных полупроводников $CdTe$ и $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$. Близкие значения периодов решетки этих соединений позволили получить малую плотность состояний на границе их раздела, а поскольку концентрация носителей в $CdTe$ на несколько порядков ниже, чем в $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$, то поток носителей при МКЭ через гетеропереход практически отсутствовал, что эквивалентно малому s^+ .

Образцы имели форму пластины 2×5 мм². Омические контакты напаявались индием на пленку $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ толщиной 30 мкм. Электрическое поле прикладывалось в виде прямоугольных импульсов длительностью 2 – 10 мкс.

При температурах выше комнатной $\tau_A \sim 10^{-8}$ с, $\tau_R \sim 10^{-6}$ с, а $\tau_0 \gg \tau_R$, так что оже-генерация была основной вплоть до концентраций, на два порядка меньших равновесной.

На рис. 1а приведены ВАХ образцов при 340 К. При магнитном поле $H = 0$ ВАХ линейна, что свидетельствует о хорошем качестве омических контактов и отсутствии разогрева носителей, ударной ионизации и контактной инжекции. Если магнитное поле отклоняет плазму к внешней поверхности узкозонной пленки, на которой скорость поверхностной рекомбинации около $2 \cdot 10^4$ см/с, ВАХ становится сублинейной. При дальнейшем увеличении магнитного поля на ВАХ образуется область N -ОДП, а на импульсе тока возникают колебания. Области, заштрихованные на ВАХ, соответствуют области колебаний. Колебания при их возникновении имели синусоидальную форму с периодом 1 мкс. При увеличении электрического поля частота колебаний возрастала, а затем колебания приобретали характер шума и исчезали. Колебания наблюдались в диапазоне 300 – 380 К. На рис. 1б представлены ВАХ того же образца при увеличении скорости поверхностной рекомбинации на свободной поверхности пленки до $s^- \approx 5 \cdot 10^5$ см/с. Увеличение s^- приводит к уменьшению величины напряжения начала колебаний и увеличению амплитуды колебаний. Это связано с тем, что уменьшается величина тока, протекающего через пинч-слой.

В экспериментах, проведенных на монокристаллах $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ при тех же условиях, N -ОДП на ВАХ и неустойчивости тока не проявлялись. Это подтверждает высказанное предположение, что для проявления эффекта необходимо иметь очень малую скорость поверхностной генерации на обедненной грани образца. Монокристаллы же $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ при высоких температурах имеют большую скорость поверхностной рекомбинации $\sim 10^4 - 10^5$ см/с.

Исследованный эффект может быть использован для изучения процессов оже-генерации носителей — до сих пор рассматривались лишь процессы оже-рекомбинации в полупроводниках. Он также может быть использован для создания на основе узкозонных полупроводников активных элементов мощных (до 1 кВт) генераторов регулярных и шумовых колебаний, работающих при комнатных и более высоких температурах.

¹⁾ Отметим, что наличие N -ОДП обусловлено конечностью величины S^+ . Если $S^+ = \infty$, при всех значениях γ ВАХ имеет только восходящий участок.

Литература

1. Грибников З.С. ФТП, 1975, 9, 1740.
2. Грибников З.С., Гуга К.Ю., Малозовский Ю.М., Малютенко В.К. Письма в ЖЭТФ, 1979, 29, 290.
3. Акопян А.А., Грибников З.С., Гуга К.Ю., и др. ФТП, 1979, 13, 2111.

Институт полупроводников
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
14 июля 1988 г.
После переработки
14 сентября 1988 г.