

## ЭФФЕКТ ОСТАТОЧНОЙ ЭДС ПРИ СВЧ ПРОБОЕ АРСЕНИДА ИНДИЯ

Бородовский П. А., Булдыгин А. Ф.

При приложении к образцу арсенида индия сильного СВЧ поля наблюдалось остаточное напряжение в течение нескольких микросекунд после окончания СВЧ импульса. В экспериментах использовались образцы из эпитаксиального  $n$ -InAs на  $n^+$ -подложке с линейными и симметричными вольтамперными характеристиками. Постоянное напряжение на образце в несколько десятков милливольт, возникающее во время СВЧ импульса, объясняется термоэдс горячих носителей заряда, а также ЭДС Дембера при возникновении СВЧ пробоя. Природа остаточной ЭДС не установлена, и предполагается, что этот новый эффект обусловлен самоподдерживающимся неоднородным распределением горячих носителей в электронно-дырочной плазме, подобным автосолитону, теоретически предсказанному Б. С. Кернером и В. В. Осповым.

При СВЧ пробое в образцах арсенида индия нами наблюдалась остаточная ЭДС в течение нескольких микросекунд после окончания СВЧ импульса. Для изготовления образцов использовались  $n-n^+$ -структуры с толщиной эпитаксиального  $n$ -слоя  $\sim 10$  мкм, концентрацией электронов от  $7 \cdot 10^{14}$  до  $3 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$  и подвижностью  $9 \cdot 10^4 \div 1.4 \cdot 10^5$  см $^2$ /В.с при 77 К. Исследуемые образцы в виде меза-диодов с диаметром индиевого контакта  $\sim 60$  мкм на  $n$ -слое включались в разрыв коаксиальной линии, к которой подводилась СВЧ мощность от импульсного СВЧ генератора с частотой 9.37 ГГц.

Вольтамперные характеристики (ВАХ) исследуемых образцов были линейными и симметричными, что и следовало ожидать, поскольку для  $n$ -InAs высота барьера Шоттки на границе раздела металл—полупроводник примерно равна нулю [1].

На рис. 1 приведены осциллограммы импульсов напряжения на образце, измеренные при различных уровнях подводимой СВЧ мощности. Наблюдаемые импульсы напряжения имеют отрицательную полярность (минус на  $n^+$ -подложке и плюс на контакте  $n$ -слоя, который в нашем случае был заземлен). При малых уровнях СВЧ мощности импульс постоянного напряжения на образце практически повторяет форму СВЧ импульса, а при больших уровнях мощности, когда начинается ударная ионизация в СВЧ поле, на заднем фронте импульса проявляется длинный хвост с временем релаксации в несколько микросекунд. Вследствие линейности и симметричности ВАХ эффект выпрямления тока в нашем случае исключается и постоянное напряжение, повторяющее по форме СВЧ импульс, является напряжением термоэдс горячих электронов. Исследованию термоэдс при разогреве электронов в полупроводниках СВЧ полем посвящен ряд работ, и этот эффект достаточно хорошо изучен (см. [2]). Здесь необходимо отметить, что при возникновении СВЧ пробоя к термоэдс добавляется ЭДС Дембера, о чем свидетельствует небольшой рост напряжения во время импульса. Для случая однородного распределения СВЧ поля и без учета инерционности имеются простые формулы, определяющие напряжение термоэдс и ЭДС Дембера горячих носителей заряда в полупроводниках. Выполнение этих условий в наших экспериментах не гарантировано, и мы не будем проводить количественного сравнения теории и эксперимента. Отметим лишь, что, согласно теории, после выключения СВЧ поля напряжение термоэдс и ЭДС

Дембера должно исчезнуть за время релаксации горячих электронов до равновесной температуры, «остаточное» напряжение после окончания СВЧ импульса поэтому должно иметь другую природу. Следует отметить, что эффект остаточной ЭДС наблюдался также в экспериментах с использованием СВЧ генератора 8-миллиметрового диапазона волн при длительности СВЧ импульса 0.08 мкс. Таким образом, пороговый характер зависимости этого эффекта от длительности СВЧ импульса нами не установлен. Эксперименты проводились с образцами, изготовленными как из эпитаксиальных  $n-n^+$ -структур, так и из монокристаллов  $n$ -InAs.

В работе [3] экспериментально обнаружено остаточное напряжение после электрического пробоя образцов  $n$ -InSb и высказано предположение о возможном механизме наблюдаемого эффекта, связанном с возбуждением неравновесных фононов и увлечением электронов.

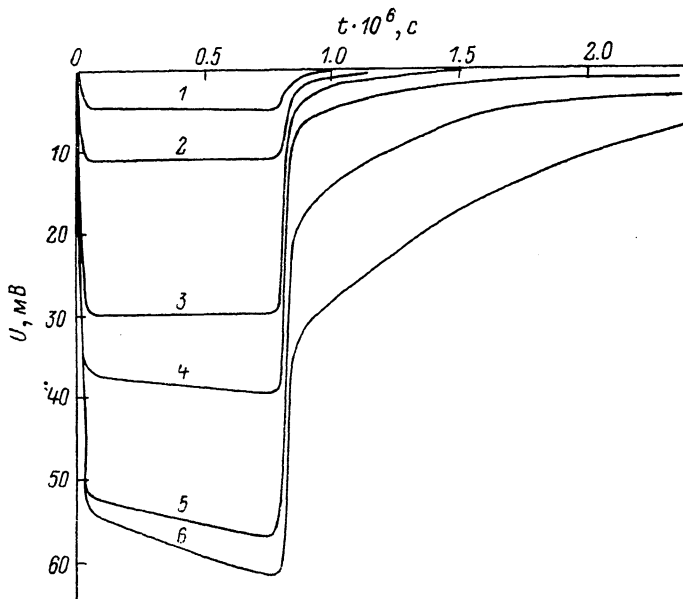


Рис. 1. Осциллограммы импульсов напряжения на образце при различных уровнях подводимой импульсной СВЧ мощности.

Р, Вт: 1 — 1, 2 — 4, 3 — 16, 4 — 55, 5 — 140, 6 — 200.

Интересно отметить, что в нашем случае время релаксации остаточного напряжения практически не зависит от сопротивления нагрузки. Так, например, подключение параллельно образцу сопротивления примерно 1 Ом не изменяло величину остаточного напряжения и время его релаксации. Это полностью исключает проявление каких-либо паразитных эффектов в цепи, поскольку при  $R \approx 1$  Ом и  $\tau \approx 2$  мкс величина емкости должна быть 2 мкФ, что нереально, если учесть малые размеры образца в нашем случае. Для одного из образцов были измерены импульсные ВАХ до СВЧ импульса (1), после СВЧ импульса (2) и во время действия СВЧ импульса (3). Результаты этих измерений приведены на рис. 2, где на вставке показана также поясняющая осциллограмма. До подачи СВЧ импульса ВАХ линейна и симметрична относительно полярности приложенного напряжения (1). После окончания СВЧ импульса (спустя 0.2 мкс) линейность ВАХ (2) практически сохраняется, но из-за остаточного напряжения симметрия нарушается. Наклон ВАХ во время действия СВЧ импульса круче за счет увеличения проводимости образца при СВЧ пробое (3). Релаксация остаточного напряжения определяется рекомбинацией неравновесных носителей заряда и в общем имеет неэкспоненциальный характер. Для исследуемого образца (рис. 1) остаточное напряжение уменьшается в 2.7 раза за время 0.9 мкс при 300 К и 0.4 мкс при 77 К. Измерения эффективного времени жизни  $\tau_{эфф}$  в  $n-n^+$ -структурах по спаду фотопроводимости при импульс-

ном освещении (СВЧ методом) показали, что  $\tau_{эфф} \approx 0.3 \div 1.5$  мкс при 300 К, а при 77 К  $\tau_{эфф} = 0.5 \div 2.8$  мкс. Температурная зависимость времени жизни в работе [4] также свидетельствует о возрастании  $\tau_{эфф}$  при охлаждении  $n-n^+$ -структур арсенида индия.

Можно предположить, что наблюдаемый эффект остаточной ЭДС обусловлен неоднородным распределением носителей в электронно-дырочной плазме. В работе [5] теоретически показано, что в собственном полупроводнике даже

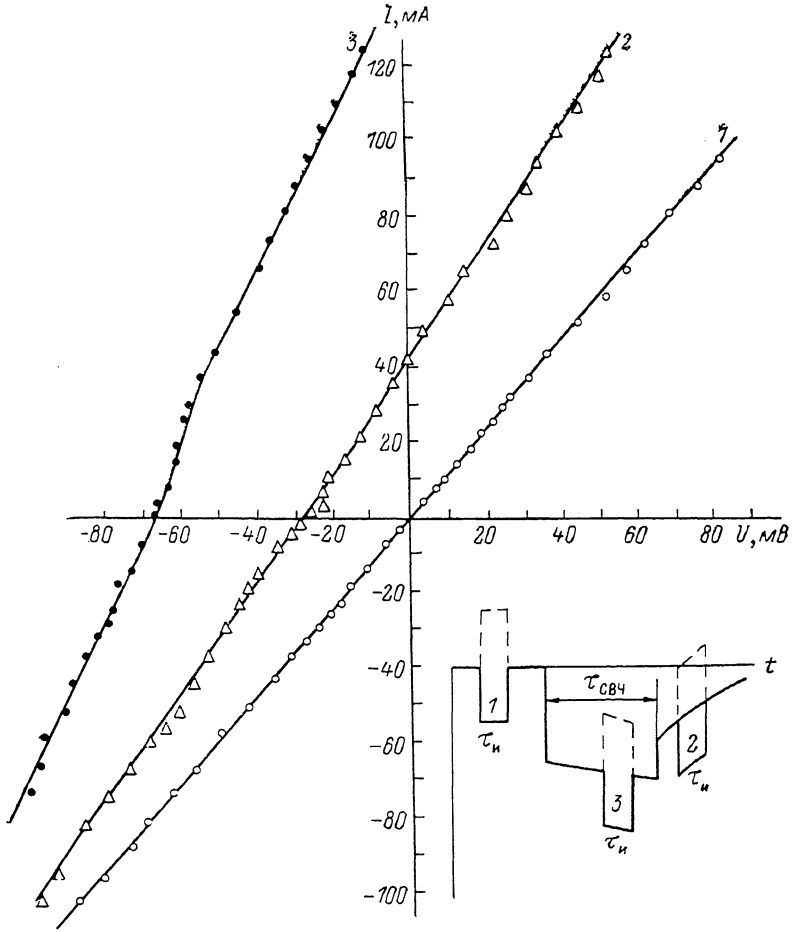


Рис. 2. Импульсные вольтамперные характеристики образца  $n-n^+$ -InAs.

1 — до приложения СВЧ импульса, 2 — спустя 0.2 мкс после окончания СВЧ импульса, 3 — во время СВЧ импульса (см. осциллограмму на вставке).  $\tau_n = 0.2$  мкс,  $\tau_{СВЧ} = 0.8$  мкс.

в очень слабых электрических полях можно возбудить устойчивое локализованное состояние пониженной концентрации и высокой температуры носителей — автосолитон. Этот автосолитон существует благодаря тому, что диффузионный поток уравновешивается термодиффузией горячих носителей. Теоретическая возможность возникновения неоднородности в электронно-дырочной плазме типа автосолитона с учетом процессов оже-рекомбинации, когда энергия, высвобождаемая при рекомбинации электронно-дырочной пары, передается третьему носителю, открывает пути для построения модели, объясняющей наблюдаемый эффект остаточной ЭДС в арсениде индия после СВЧ пробоя.

Л и т е р а т у р а

[1] Allen R. E., Humphreys T. J. — J. Vac. Sci. Techn. B, 1984, v. 2, N 3, p. 449—452.  
 [2] Ашмонтас С. Электроградиентные явления в полупроводниках. Вильнюс, 1984. 183 с.  
 [3] Ishii T., Inuishi Y. — Japan. J. Appl. Phys., 1968, v. 7, N 10, p. 1300.

- [4] Фомин И. А., Лебедева Л. В., Лунькина Г. В., Лебедев В. В. Исследование времени жизни в эпитаксиальном  $n$ -InAs. — ФТП, 1980, т. 14, в. 7, с. 1434—1436.
- [5] Кернер Б. С., Осипов В. В. Сильно равновесные локализованные состояния в системах, слабо отклоненных от термодинамического равновесия. — Письма ЖЭТФ, 1985, т. 41, в. 9, с. 386—388.

Институт физики полупроводников  
СО АН СССР  
Новосибирск

Получена 23.04.1987  
Принята к печати 22.09.1987

---