

- [2] В а й с ф е л ь д М.П., П о л ь с к о й Ю.Е. - Квантовая электроника, 1981, т. 8, с. 2230-2233.
- [3] К о л е с н и к о в В.Ю., О р л о в Б.В., П о л ь с к о й Ю.Е., Х о х л о в Ю.М. - Квантовая электроника, 1984, т. 11, с. 957-961.
- [4] X i n J.G., H a l l D.R. - Appl. Phys. Lett., 1987, v. 51, p. 469-471.
- [5] S e g u i n H.J.J., С а р ж а с к С.Е., A n t o n i u k D.M., H a m K.H. - J. Appl. Phys., 1984, v. 55, p. 788-793.
- [6] Д о р ф м а н Л.А. Гидродинамическое сопротивление и теплоотдача вращающихся тел, М.: Физматгиз, 1960.
- [7] H e r r i o t t D., К о г е л н и к Н., К о м р f n e r H. Appl. Opt., 1964, v. 3, p. 523-529.

Поступило в Редакцию
10 апреля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 16

26 августа 1988 г.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СУБНАНОСЕКУНДНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ АРСЕНИДГАЛЛИЕВЫХ ДИОДНЫХ СТРУКТУР

С.Н. В а й н ш т е й н, Ю.В. Ж и л я е в,
М.Е. Л е в и н ш т е й н

В 1979 году в работе [1] был обнаружен эффект, названный авторами эффектом обострения. Эффект состоял в очень быстром, субнаносекундном переключении Si р-п-структур из высокоомного в проводящее состояние при подаче на структуру быстро нарастающего напряжения U_0 . Время переключения t_0 было в 10-20 раз меньше, чем время $t_S = \frac{W_n}{U_S}$, где W_n - толщина базы р-п-структуры, U_S - максимально возможная дрейфовая скорость носителей в полупроводниковом материале. Недавно аналогичный эффект наблюдался в $GaAs$ р-п-структурах [2].

Несмотря на многочисленные попытки [3, 4] объяснить природу переключения со столь большим отношением t_S/t_0 до сих пор не удавалось.

Следует учесть, однако, что при попытках объяснения такого сверхбыстрого переключения всегда предполагалось, что эффект носит объемный характер и происходит по всей площади прибора. Соображения, на которых основывался такой подход, носили косвенный характер и никогда не проверялись в прямом эксперименте.

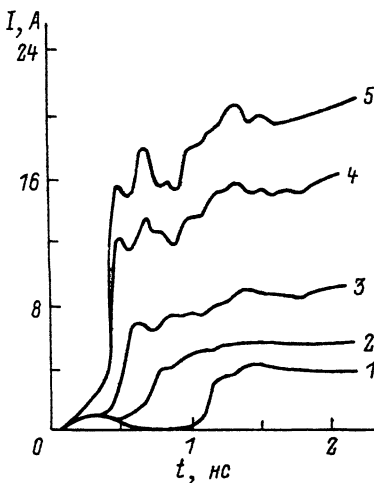
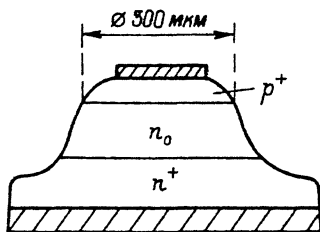


Рис. 1. Зависимости тока от времени при различных амплитудах обратного напряжения U_0 на диоде, подаваемого на образец с фронтом $t_f \sim 200$ пс, (В): 1 - 600, 2 - 800, 3 - 1200, 4 - 2000, 5 - 2500. Остаточные падения напряжения на структуре к моменту времени $t \cong 4$ нс $U_{ост}$ (В): 1 - 180, 2 - 140, 3 - 200, 4 - 160, 5 - 110. На вставке - форма образцов.

В настоящей работе с помощью электронно-оптического преобразователя (ЭОП) впервые проделано непосредственное визуальное наблюдение процесса сверхбыстрого переключения.

Исследовались GaAs p-n-структуры, полученные методом газофазной эпитаксии [5]. Толщина n_0 -базы $W_n \sim 40-50$ мкм, p-эмиттера $W_p \sim 15$ мкм. Характерное значение концентрации доноров в базе $N_d \sim (5-8) \cdot 10^{14}$ см⁻³, акцепторов в эмиттере $N_a \sim 10^{17} - 10^{18}$ см⁻³. Форма образцов показана на вставке к рис. 1.

При измерениях на постоянном токе характерное значение напряжения лавинного пробоя U_s составляло $U_s \sim 350-400$ В.

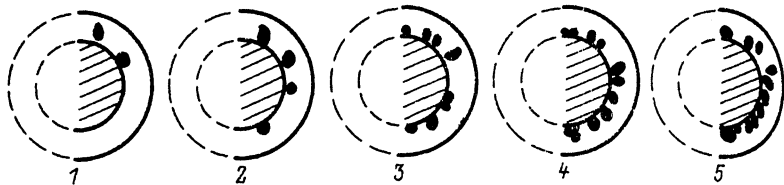


Рис. 2. Распределение светящихся участков на поверхности образца по фаске меза-структуры при тех же значениях U_0 , что и на рис. 1. U_0 (В): 1 - 600, 2 - 800, 3 - 1200, 4 - 2000, 5 - 2500. Левая часть фаски по условиям эксперимента закрыта для наблюдения.

Наблюдения, сделанные с помощью ЭОП, показывают, что пробой носит микроплазменный характер. Первая микроплазма диаметром 30-50 мкм возникает на фаске структуры (поверхностный пробой).

Для проведения экспериментов по субнаносекундному переключению образец помещался в разрыв 50-омной микрополосковой линии. Высоковольтные импульсы с длительностью фронта $t_f \sim 200$ пс формировались с использованием высоковольтного ртутного реле. Временное разрешение схемы составляло 100-130 пс.

На рис. 1 показаны осциллограммы тока через обратносмещенный диод при различных напряжениях U_0 , подаваемых на структуру с фронтом $t \sim 200$ пс. Результаты аналогичны описанным в работах [1, 2, 6]. Так же, как в [1, 2, 6], с ростом отношения $\frac{U_0}{U_s}$ время задержки переключения и длительность фронта нарастают, а ток уменьшается. При больших значениях U_0 (кривые 4, 5 рис. 1) длительность фронта соответствует временному разрешению схемы и не превышает 100 пс. Как и в [2], увеличение U_0 приводит к уменьшению разброса в величине задержки (*jitter*). Для кривых 4, 5 (рис. 1) *jitter* практически отсутствует, что свидетельствует о временной стабильности переключения не хуже 30-50 пс.

Таким образом, в эксперименте воспроизводятся все результаты, которые давали ранее основание трактовать сверхбыстрое переключение, как объемное и однородное по площади.

На рис. 2 воспроизведена с фотопленки картина распределения светящихся участков на поверхности фаски, зафиксированная на экране ЭОП в тех же режимах, для которых сняты осциллограммы 1-5 рис. 1. Видно, что переключение происходит по поверхности, причем с ростом U_0 растет число каналов переключения.

Наиболее интересной особенностью картины переключения является то обстоятельство, что при полном отсутствии нестабильности фронта в пределах $\lesssim 50$ пс переключение, даже в режиме разовых импульсов, происходит по нескольким (при больших значениях U_0 - до двух десятков), по-видимому, независимым каналам.

Светящиеся пятна на рис. 2, отождествляемые с каналами переключения, имеют диаметр $\sim 30-50$ мкм. Такая их форма устанавливается за время полной длительности импульса порядка нескольких наносекунд. Для некоторых каналов было проделано наблюдение за процессом переключения при использовании ЭОП в режиме луты времени с временным разрешением ≤ 0.5 нс. Установлено, что свечение на фронте нарастания тока возникает вначале в весьма узком канале диаметром ≤ 10 мкм. И лишь затем свечение захватывает область размером $\sim 30-50$ мкм.

Таким образом, субнаносекундное (сверхбыстрое) переключение р-п-структур при резком нарастании обратного напряжения может быть связано с переключением по отдельным узким токопроводящим каналам.

Механизм такого переключения качественно можно представить себе, по-видимому, следующим образом. В соответствии с результатами [3, 4, 7], переключение начинается в тот момент, когда концентрация подвижных носителей, растущая за счет лавинного размножения, сравнивается с концентрацией доноров в базе ($n \approx p \approx N_d$). Можно предположить, что как только это условие выполняется в какой-либо точке прибора, в ней формируется проводящий канал, начинающий расти от р-п-перехода к p^+ -слою (аналогично стримеру). В течение времени распространения проводящего шнура

$t_d \sim \frac{W_n}{v}$ (v - скорость движения головки шнура) напряжение на приборе остается высоким и условие переключения может выполняться еще в нескольких точках. Из этих точек также начинают распространяться проводящие шнуры. До тех пор, пока напряжение на структуре не упадет до достаточно малой величины, шнуры продолжают распространяться. Часть из них успевает пробежать всю базу и образовать токопроводящие каналы.

Характерное время разброса между зарождением шнуров Δt можно по порядку величины оценить как $\Delta t \sim (\alpha \cdot v_s)^{-1}$, где α - характерная величина коэффициента ударной ионизации в максимальном (у р-п перехода) поле E_m . Приняв для оценки распределение поля в базе близким к стационарному [3, 7], при $U_0 = 600$ В получим $E_m \sim 3 \cdot 10^5$ В/см, $\alpha \sim 5 \cdot 10^3$ см $^{-1}$ [8]. Для $U_0 = 2500$ В/см величина $E_m \sim 6 \cdot 10^5$ В/см, $\alpha \sim 10^5$ см $^{-1}$ [8]. При $v_s \sim 10^7$ см/с величина Δt лежит, таким образом, в диапазоне 20-1 пс, уменьшаясь с ростом U_0 .

Время пробега шнура $t_d \approx \frac{W_n}{v}$, определяющее время фронта переключения, зависит от скорости движения головки шнура v , которая может лежать в диапазоне от $v \sim v_s = 10^7$ см/с до $v \geq 10^9$ см/с характерной для стримерных разрядов при больших перенапряжениях. При $W_n = 50$ мкм величина t_d может лежать, таким образом, в диапазоне $500 \div 5$ пс, уменьшаясь с ростом U_0 .

Видно, что грубые качественные оценки значений t_d и Δt не противоречат наблюдаемой экспериментально картине и высказанным соображениям о природе переключения.

Заметим, что аналогичная картина субнаносекундного переключения в принципе может реализовываться и в объеме диода, если краевой контур р-п-структуры достаточно надежно защищен от поверхностного пробоя.

Авторы признательны М.И. Дьяконову, В.Ю. Качоровскому и С.В. Шендереку за стимулирующие дискуссии.

Л и т е р а т у р а

- [1] Грехов И.В., Кардо-Сысоев А.Ф. - Письма в ЖТФ, 1979, т. 5, № 15, с. 950-953.
- [2] Алферов Ж.И., Грехов И.В., Ефанов В.М. и др. - Письма в ЖТФ, 1986, т. 13, в. 18, с. 1089-1093.
- [3] Биленко Ю.Д., Левинштейн М.Е., Попова М.В., Юферев В.С. - ФТП, 1983, т. 17, № 10, с. 1812-1816.
- [4] Биленко Ю.Д., Левинштейн М.Е., Юферев В.С. - ФТП, 1986, т. 20, № 4, с. 776 (депон.).
- [5] Ботнарюк В.М., Дьякону И.И., Жиляев Ю.В. и др. - Письма в ЖТФ, 1982, т. 8, в. 23, с. 1442-1445.
- [6] Грехов И.В., Кардо-Сысоев А.Ф., Шендере С.В. - ПТЭ, 1981, в. 4, с. 135-136.
- [7] Scharfetter D.L., Bartelink D.L., Gummel H.K., Johnston R.L. - IEEE Trans. Electron Dev., 1968, v. ED-15, N 9, p. 691-697.
- [8] Корольков Б.И., Михайлова М.П., Пonomарев С.И. - Электронная техника. Серия "Электровакуумные и газоразрядные приборы", 1984, в. 11(100), с. 31-44.

Поступило в Редакцию
17 мая 1988 г.