

06

## Исследование процесса распределения напряжения по структурам в мощном полупроводниковом прерывателе тока

© А.В. Пономарев, С.Н. Рукин, С.Н. Цыранов

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

E-mail: rukin@ier.uran.ru

Поступило в Редакцию 31 мая 2001 г.

На основе физико-математической модели исследован процесс распределения напряжения по последовательным структурам полупроводникового прерывателя на стадии обрыва тока. Установлено существование механизма, благодаря которому происходит выравнивание распределения напряжения по структурам  $p^+ - p - n - n^+$ -типа с различной глубиной залегания  $p - n$ -перехода  $X_p$ . Механизм обусловлен тем, что в структурах с большей величиной  $X_p$  образование области сильного поля на стадии обрыва тока начинается позже, но расширение этой области происходит с большей скоростью, чем в структурах с меньшей величиной  $X_p$ .

1. Полупроводниковые прерыватели тока — SOS-диоды — применяются для генерирования мощных наносекундных импульсов в схемах с индуктивным накопителем энергии [1]. SOS-диод представляет собой сборку из большого числа последовательно соединенных кремниевых структур  $p^+ - p - n - n^+$ -типа. При последовательном соединении полупроводниковых приборов очень важным с практической точки зрения является вопрос обеспечения равномерного распределения напряжения по структурам, что необходимо для надежной и безаварийной работы импульсного устройства. Для этой цели используются либо резистивные делители напряжения, компенсирующие технологический разброс характеристик структур, возникающий при их изготовлении, либо структуры перед сборкой предварительно отбираются по вольт-фарадным и вольт-амперным характеристикам [2].

Эксплуатация SOS-диодов показала, что они надежно работают и без применения вышеуказанных мер даже при напряжении мегавольтного уровня, когда число последовательно соединенных структур в прерывателе превышает  $10^3$  штук. Этот факт позволяет предположить, что в

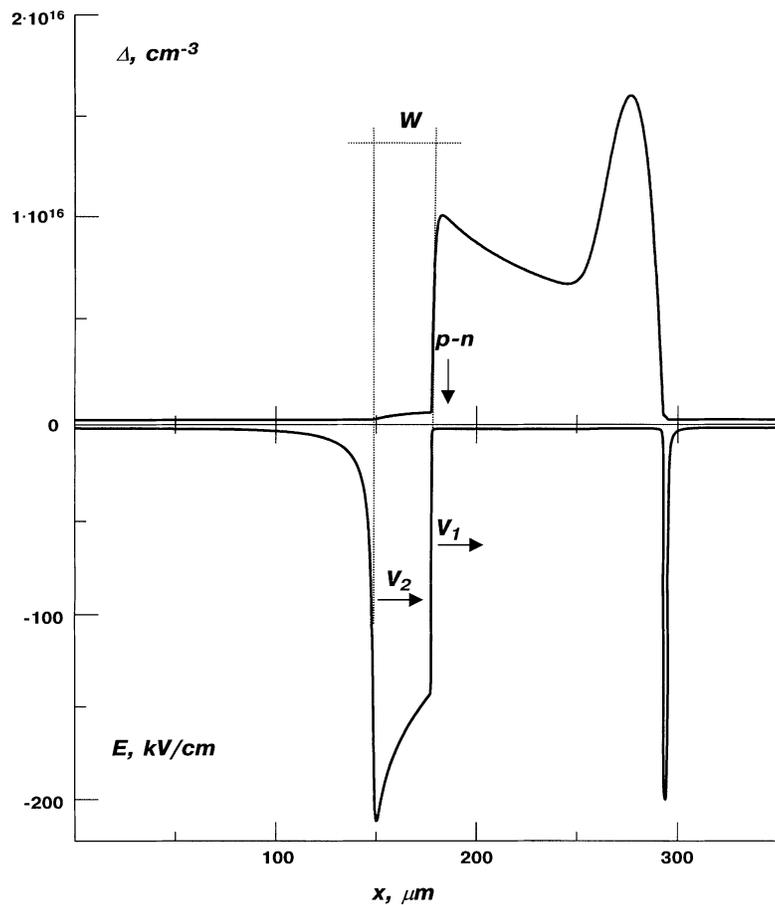
SOS-диодах существует некий внутренний механизм, обеспечивающий равномерное распределение напряжения по большому числу последовательно соединенных структур. Отличительная характеристика профиля легирования структуры SOS-диода состоит в большой глубине залегания  $p$ - $n$ -перехода  $X_p$ , достигающей  $200 \mu\text{m}$  [3,4]. Величина  $X_p$  является основной характеристикой, определяющей процесс формирования области сильного поля (ОСП) в структуре на стадии обрыва тока, а ширина ОСП и скорость ее образования определяют максимальную величину напряжения на структуре.

Цель работы состоит в исследовании процесса распределения напряжения на стадии обрыва тока по последовательным структурам SOS-диода, имеющим различную величину  $X_p$ .

2. Для расчета использовалась физико-математическая модель, описанная в [5]. Структура SOS-диода и схема накачки соответствовали работе [3]. Исследуемый SOS-диод содержал 10 последовательно соединенных структур. Для моделирования технологического разброса параметров величина  $X_p$  в структурах была выбрана различной и лежала в диапазоне от  $170$  до  $188 \mu\text{m}$  с шагом  $2 \mu\text{m}$ . Площадь структур —  $0.24 \text{cm}^2$ .

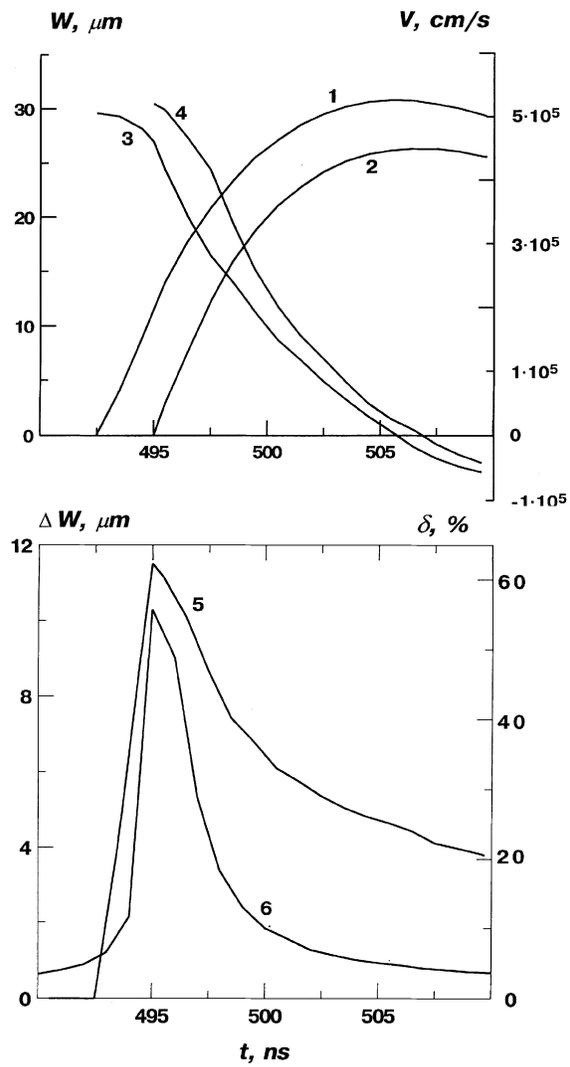
При включении конденсатора прямой накачки в структуры вводился прямой ток плотностью до  $1.75 \text{kA/cm}^2$  за время  $420 \text{ns}$ . При последующем включении конденсатора обратной накачки в структуры вводился обратный ток, плотность которого к моменту обрыва тока достигала  $4.6 \text{kA/cm}^2$  за время  $70 \text{ns}$ .

Рис. 1 иллюстрирует введенные обозначения. На стадии обрыва тока в  $p$ -области структуры возникает характерная область сильного поля ОСП с четко выраженными границами, имеющая ширину  $W$ , и расширяющаяся со скоростью  $V = V_1 - V_2$ , где  $V_1$  и  $V_2$  — скорости движения правой и левой границ ОСП соответственно. Правая граница этой области совпадает с положением фронта избыточной плазмы, а левая соответствует точке, где выполняется условие насыщения тока. Пробивное поле в области имеет величину около  $200 \text{kV/cm}$  и слабо меняется на стадии обрыва тока. При этом напряжение на структуре определяется главным образом шириной области  $W$ . В начале процесса обрыва тока за счет большей скорости  $V_1$  движения правой границы поля происходит расширение области и рост напряжения на структуре. Затем скорости движения границ падают, причем скорость левой границы  $V_2$  начинает превышать скорость правой, что приводит к сужению ОСП и спаду напряжения на структуре [3].



**Рис. 1.** Распределение концентрации избыточной плазмы и электрического поля в структуре с  $X_p = 180 \mu\text{m}$  на стадии обрыва тока плотностью  $4.6 \text{ kA/cm}^2$  (стрелкой обозначена позиция  $p-n$ -перехода).

Отметим также, что характерная область сильного поля на стадии обрыва тока существует и в правой части структуры вблизи  $n-n^+$ -перехода (рис. 1). Однако ее существование практически не влияет на процесс обрыва тока и на величину напряжения на структуре, поскольку ширина этой области составляет единицы  $\mu\text{m}$ .



**Рис. 2.** Зависимости ширины области сильного поля  $W$  (1, 2), скорости ее изменения  $V$  (3, 4), разности  $\Delta W$  (5) и отклонения  $\delta$  (6) от времени на стадии обрыва тока для структур с  $X_p = 170 \mu\text{m}$  (кривые 1, 3) и  $188 \mu\text{m}$  (кривые 2, 4).

3. Было установлено, что в структурах с меньшей величиной  $X_p$  формирование ОСП начинается раньше, чем в структурах с большей величиной  $X_p$ . Наибольшая разница во времени наблюдается для структур с наиболее отличающимися  $X_p$  (170 и 188  $\mu\text{m}$ ) и составляет 2.5 ns (рис. 2). Для этих же структур наблюдается и максимальное различие в величине  $W$ , а следовательно, и в напряжении на структурах. Механизм более раннего срабатывания структур с меньшей величиной  $X_p$  состоит в следующем. На стадии прямой накачки, когда происходит накопление заряда в  $p$ -области структуры, концентрация избыточной плазмы в структурах с меньшими значениями  $X_p$  оказывается выше, поскольку один и тот же накопленный заряд распределяется по меньшей толщине  $p$ -слоя. Соответственно в структурах с меньшей величиной  $X_p$  интенсивность процессов рекомбинации оказывается выше, а количество накопленного заряда, который затем может быть выведен из структуры обратным током, уменьшается. На стадии обратной накачки при одном и том же законе изменения плотности тока во времени (последовательное соединение структур) меньшая величина накопленного заряда в структурах с меньшими значениями  $X_p$  приводит к тому, что условие насыщения скоростей носителей в  $p$ -области структуры и начало процесса формирования ОСП наступают раньше, чем в структурах с большей величиной  $X_p$ .

К моменту начала образования ОСП в структуре с  $X_p = 188 \mu\text{m}$  (кривая 2, рис. 2) ширина ОСП в структуре с  $X_p = 170 \mu\text{m}$  (кривая 1, рис. 2) достигает 11.5  $\mu\text{m}$ . В этот момент времени неоднородность распределения напряжения по структурам максимальна, а наибольшее отклонение напряжения  $\delta$  от среднего значения наблюдается для структуры с  $X_p = 170 \mu\text{m}$  и достигает 56% при оценке  $\delta$  из выражения:  $\delta = |U_i - U_{\text{ср}}| \cdot 100\% / U_{\text{ср}}$ , где  $U_{\text{ср}}$  — среднеарифметическая величина напряжения, приходящегося на одну структуру (кривая 6, рис. 2).

В [3] было показано, что в структурах с большей величиной  $X_p$  реализуются и более высокие скорости расширения ОСП благодаря более низкой концентрации избыточной плазмы в  $p$ -области структуры. Как видно из рис. 2 (кривые 3 и 4) скорость  $V$  расширения ОСП в структуре с  $X_p = 188 \mu\text{m}$  всегда превышает скорость расширения ОСП в структуре с  $X_p = 170 \mu\text{m}$ . Данное обстоятельство приводит к тому, что в процессе обрыва тока снижается как разница  $\Delta W$  по ширине ОСП в структурах, так и отклонение напряжения  $\delta$  от среднего значения. К моменту достижения максимального напряжения на структурах (максимальное значение  $W$ ) разность по ширине ОСП

не превышает  $5 \mu\text{m}$  (кривая 5, рис. 2), а величина  $\delta$  снижается до 4% (кривая 6, рис. 2).

4. Таким образом, моделирование показало, что на стадии обрыва тока и роста напряжения на последовательно соединенных структурах SOS-диода существует механизм выравнивания распределения напряжения по структурам, глубина залегания  $p-n$ -перехода в которых различна. Механизм обусловлен тем, что в структурах с большей величиной  $X_p$  образование области сильного поля на стадии обрыва тока начинается позже, но расширение этой области происходит с большей скоростью, чем в структурах с меньшей величиной  $X_p$ .

## Список литературы

- [1] Рукин С.Н. // ПТЭ. 1999. № 4. С. 5–36.
- [2] Тучкевич В.М., Грехов И.В. Новые принципы коммутации больших мощностей полупроводниковыми приборами. Л.: Наука, 1988. 117 с.
- [3] Дарзбек С.А. и др. // ЖТФ. 2000. Т. 70. В. 4. С. 56–62.
- [4] Дарзбек С.А. и др. // Электротехника. 1999. № 4. С. 20–28.
- [5] Дарзбек С.А. и др. // ЖТФ. 1997. Т. 67. В. 10. С. 64–70.