

Кратковременное включение микроплазм при напряжении ниже порогового

© В.Н. Добровольский, И.Е. Пальцев, А.В. Романов

Киевский Государственный университет,
252127 Киев, Украина

(Получена 22 апреля 1996 г. Принята к печати 22 мая 1996 г.)

Исследовалась кинетика установления тока через $p-n$ -переход с микроплазмами после приложения к нему напряжения, меньшего порогового напряжения включения микроплазм в стационарных условиях. Наблюдалось кратковременное включение микроплазм и протекание тока, превышающего стационарное значение более чем на порядок. Предложено объяснение наблюдавшегося эффекта. Оно базируется на обнаруженном ранее сильном влиянии на лавинный ток неоднородного разогрева $p-n$ -перехода.

При микроплазменном пробое $p-n$ -перехода на обратной ветви его вольт-амперной характеристики (ВАХ) есть области неустойчивости тока. Если напряжение на $p-n$ -переходе (U) находится в такой области, то ток через переход (I) имеет компоненту, хаотически изменяющуюся во времени [1]. Причина ее возникновения такова. В области пространственного заряда (ОПЗ) $p-n$ -перехода есть каналы микроплазм. Это — участки с напряженностью электрического поля, большей чем в остальной части ОПЗ. При неустойчивости напряженность электрического поля в канале достаточна для лавинного умножения в нем электронов и дырок, а вне его — недостаточна. Электрон (дырка), случайно попавший в канал, запускает там лавину и увеличивает ток — включает микроплазму. При этом ток через канал микроплазмы и число в ней электронов и дырок малы. Поэтому велика вероятность случайного ухода из канала всех электронов и дырок и прекращения лавинного тока — выключения микроплазмы.

При напряжении U , меньшем нижней границы области неустойчивости, лавинное умножение в канале микроплазмы не происходит. При U , большем верхней границы этой области, число электронов и дырок в канале велико и через него устанавливается стационарный ток лавинного умножения. Обозначим через U_l напряжение нижней границы области неустойчивости самой низковольтной из микроплазм $p-n$ -перехода. Оно является пороговым. При $U < U_l$ все микроплазмы выключены, а при $U > U_l$ включена одна или большее число микроплазм. Таково известное поведение микроплазм.

Нами на кремниевых $p-n$ -переходах обнаружена возможность иного поведения — кратковременное включение микроплазм при значениях U ниже порогового.

1. Используемые $p-n$ -переходы были подобны переходам работ [2,3]. Они отличались наличием микроплазм. Экспериментальный образец представлял собой кристалл в форме диска диаметром 1.8 мм и толщиной 0.25 мм. Измерения проводились также и на диодах КД 243. В них такие кристаллы были заключены в пластмассовый корпус.

Кривая 1 на рисунке — ВАХ одного из $p-n$ -переходов. Она снята с экрана осциллографа при подаче на $p-n$ -переход нарастающего за 1 мин от 0 до 1330 В

напряжения U . С ним суммировалось пилообразное напряжение с частотой 500 Гц амплитудой 6 В. Участки шума на ВАХ — области неустойчивости тока.

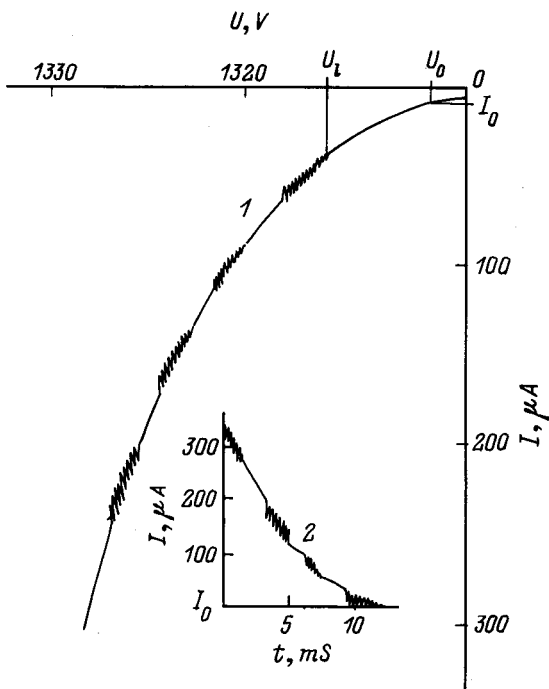
Осциллограмма тока 2 снята при включении постоянного напряжения $U_o < U_l$. Фронт его нарастания был менее 1 мкс, значения U_o и U_l указаны на рисунке. Первоначально большой ток со временем t падает до значения I_o , которое реализуется на ВАХ (кривая 1) при $U = U_o$. На осциллограмме наблюдаются участки шума. Их число такое же, как и на ВАХ. Значения тока на них близки к значениям на соответствующих участках ВАХ. С уменьшением U_o начальный ток и число участков шума уменьшалось.

2. В работах [2,3] исследовалось влияние на ток ударной ионизации продольного неоднородного разогрева безмикроплазменных $p-n$ -переходов. Обнаружено, что даже малый, но резко неоднородный разогрев, может существенно уменьшить ток ударной ионизации — практически выключить. Сильное влияние неоднородного разогрева объясняется действием механизма, теоретически рассмотренного в статье [4].

Используя результаты [2–4], наблюдающееся изменение тока в $p-n$ -переходе с микроплазмами можно объяснить следующим образом. При подаче напряжения U_o в $p-n$ -переходе включаются четыре микроплазмы. Ударная ионизация в их каналах обуславливает большой ток. По мере разогрева каналов механизм [4] сначала уменьшает, а затем полностью прекращает протекающие через них токи ударной ионизации — выключает микроплазмы. Перед выключением каждой микроплазмы ток через ее канал и число в нем электронов и дырок малы. Поэтому вероятность их одновременного выхода из канала велика, и это приводит к характерному шуму.

Из сопоставления значений токов на участках шума кривых 1 и 2 следует, что выключение начинается с наиболее высоковольтных микроплазм. Такая последовательность согласуется со следующей из работ [2,4] закономерностью — с ростом напряжения лавинного пробоя усиливается влияние неоднородного разогрева на ток ударной ионизации.

Величина разогрева каналов микроплазм составляла около 1.5 К. Она была оценена следующим образом. Из ВАХ было определено напряжение пробоя $p-n$ -перехода



Вольт-амперная характеристика $p-n$ -перехода с микроплазмой (1) и осциллограмма тока (2).

U_b . С помощью приведенных в [5] зависимостей U_b и толщины ОПЗ при пробое от концентрации примесей найдена длина микроплазмы, она составляет 0.1 мм. Диаметр микроплазм обычно порядка их длины [1]. В предположении их равенства было вычислено тепловое сопротивление каналов микроплазм [1], а затем степень разогрева. Разогрев в несколько раз меньше того, при котором выключался ток ударной ионизации в безмикроплазменном $p-n$ -переходе с $U_b \simeq 400$ В [3].

При включении U_0 , большего напряжений нестабильности всех микроплазм, начальный ток был больше тока I_0 на ВАХ (рисунок, кривая 1). Затем ток без шумовых участков падал до значения I_0 . Отсутствие шума объясняется следующим образом. Разогрев уменьшает токи ударной ионизации через каналы микроплазм и вне их. Однако из-за большого U_0 он не приводит к выключению микроплазм и сопровождающему этот процесс шуму.

Как и в безмикроплазменном $p-n$ -переходе [3], имел место эффект памяти. Напряжение U_0 выключалось, а затем вновь включалось через некоторый промежуток времени. При таком повторном включении начальный большой ток (кривая 2) наблюдался только при длительности промежутка порядка секунды и более.

При неизменной энергии первого импульса наблюдавшиеся эффекты практически не изменялись в диапазоне $77 \div 300$ К.

3. Приведенное объяснение опирается на механизм [4] сильного влияния на лавинный пробой неоднородного разогрева $p-n$ -перехода. С другой стороны, к выключению микроплазм может привести и тривиальное увеличение U_b из-за уменьшения разогревом (однородным

или неоднородным) коэффициентов ударной ионизации электронов и дырок [1]. О том, что это не так, говорят следующие соображения.

Для выключения микроплазм нужен рост U_b более чем на величину разности напряжения существования самой высоковольтной микроплазмы и U_l . Расчеты по формулам [1] показывают, что при комнатной температуре его может обеспечить разогрев не менее чем на 10 К. При низких температурах его величина должна достигать сотен градусов. И то и другое меньше оцененного разогрева канала.

Описанные особенности поведения микроплазм нужно учитывать при прогнозировании надежности полупроводниковых приборов с помощью микроплазменных характеристикографов [6].

Список литературы

- [1] И.В. Грехов, Ю.Н. Сerezкин. *Лавинный пробой $p-n$ -перехода в полупроводниках* (Л., Энергия, 1980).
- [2] В.Н. Добровольский, А.В. Романов. *ФТП*, **26**, 1361 (1992).
- [3] В.Н. Добровольский, А.В. Романов, С.Б. Грязнов. *ФТП*, **29**, 1453 (1995).
- [4] В.Н. Добровольский, С.Б. Грязнов. *ФТП*, **26**, 1366 (1992).
- [5] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1964) ч. 1.
- [6] Р.В. Конакова, П. Кордош, Ю.А. Тхорик, В.И. Файнберг, Ф. Штофаник. *Прогнозирование надежности полупроводниковых лавинных диодов* (Киев, Наук. думка, 1986).

Редактор Л.В. Шаронова

A momentary microplasma switch under below threshold voltage

V.N. Dobrovolskii, I.E. Paltsev, A.V. Romanov

Kiev State University,
252127 Kiev, Ukraine