

ТОКИ ОТДЕЛЬНЫХ ЛАВИН В ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА p - n -ПЕРЕХОДА

© В.Н.Добровольский, А.Д.Сырых

Киевский университет,
252127 Киев, Украина

(Получена 17 апреля 1995 г. Принята к печати 17 июля 1995 г.)

Известное ранее для микроплазм прохождение отдельных электронно-дырочных лавин в начале пробоя p - n -перехода наблюдалось в планарно-однородных переходах большой площади. Из полученных результатов сделан вывод о локализации перед началом пробоя тока ударной ионизации, возникновении лавин именно в канале протекания этого тока, оценены размеры лавин и объяснено уменьшение тока ударной ионизации после прохождения каждой лавины с достаточно большим временем существования.

Лавинный пробой p - n -переходов малой площади начинается с протекания при малых, но уже достаточных для заметной ударной ионизации электронов и дырок, напряжениях U хаотического тока [1]. Его возникновение является прямым следствием вероятностного характера процесса ударной ионизации и небольшого числа электронов и дырок в области пространственного заряда (ОПЗ) перехода такой площади. Механизм тока следующий. Электрон (дырка), попавший в ОПЗ, запускает там электронно-дырочную лавину и через переход начинает протекать ее ток. Поскольку число электронов и дырок в лавине мало, есть конечная вероятность ее прекращения через некоторый промежуток времени в результате выхода из ОПЗ всех носителей заряда, которые могут продолжить лавину. После прекращения лавины и до случайного попадания в ОПЗ следующего запускающего носителя лавинный ток через ОПЗ не протекает. Так при постоянном U формируются хаотические импульсы тока. Каждому из них соответствует отдельная лавина. При этом малая площадь перехода помогает выполнить условие малости в ОПЗ числа носителей заряда.

Описанное явление называют микроплазменным пробоем, а сам переход с малой площадью — искусственной микроплазмой [1].

Хаотический ток наблюдается и в p - n -переходах большой площади (размеры сечения много больше длины ОПЗ при напряжении ударной ионизации [1]), если в них есть макродефекты, которые создают в ОПЗ малые участки повышенного поля — естественные микроплазмы.

При малых U необходимо для протекания хаотического тока условие малости ОПЗ числа носителей заряда можно обеспечить и в совершенных однородных переходах большой площади с малой плотностью термогенерационного тока. Однако наблюдение его в таких объектах не описывалось. С другой стороны, реализация хаотического тока и исследование прохождения отдельных лавин в однородных переходах большой площади интересно по следующей причине. В микроплазмах место возникновения и развитие лавин заранее определено и ограничено малой областью сильного поля, а в однородных переходах большой площади такого ограничения нет.

В настоящей статье описаны эксперименты, в которых наблюдались хаотические импульсы тока отдельных лавин в однородных $p-n$ -переходах большой площади, сделанные из них заключения о закономерностях протекания тока ударной ионизации в начале лавинного пробоя и оценки характеристик лавин.

1. Снимались вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов КД258, изготовленных по технологии фирмы Philips. Кремниевый кристалл диода имел форму диска диаметром 1.5 мм и толщиной 240 мкм. Концентрация доноров в n -части кристалла была меньше концентрации акцепторов в p -части. Напряжение лавинного пробоя $U_b = 690.4$ В. Определенная по этому напряжению длина ОПЗ [2] $l = 40$ мкм. До 500 В плотность термогенерационного тока была менее 55 мкА/см².

При лавинном пробое ток резко растет с напряжением. Заранее ясно, что участок напряжения с нестабильным током мал. Поэтому при питании диода от источника постоянного напряжения его легко пропустить. В связи с этим такой способ питания не использовался, а при снятии ВАХ через диод пропускались одиночные импульсы тока длительностью 2 с от управляемого стабилизатора тока. Он задавал и с характерным временем инерционности 1 мс поддерживал постоянным средний ток $\langle I \rangle$. Более быстрые изменения тока не стабилизировались.

Полученная ВАХ приведена на рис. 1. При достижении током $\langle I \rangle$ значения I_1 на фоне стационарного тока I_0 возникали импульсы (рис. 2, а) с хаотически изменяющимися паузами между ними и длительностями. С ростом $\langle I \rangle$ первые укорачивались, а вторые росли (рис. 2, б). Средняя частота импульсов на осциллограмме рис. 2, б составляла 70 кГц. Разогрев диода до 80 °С увеличивал ее до 100 кГц. На вершинах импульсов был шум. При $\langle I \rangle = I_2$ импульсы сливались и устанавливался постоянный ток.

По окончании каждого длинного импульса ток падал от значения I_{\max} до $I_{\min} < I_0$, а затем рос до I_0 за время τ (фрагмент 1 на рис. 2, б), если этот рост не прерывался следующим длинным импульсом (2). При этом короткие импульсы подобного падения тока не вызывали (3, 4). Время τ практически не зависело от $\langle I \rangle$ и составляло приблизительно 10 мкс.

2. Наблюдающийся хаотический ток типичен для микроплазм [1]. Однако у использованного перехода диаметр много больше l и он не является искусственной микроплазмой. Наблюдающийся эффект не связан и с пробоем естественной микроплазмы. Об этом свидетельствуют следующие факты.

Описанные измерения были проведены на 10 случайно выбранных диодах. Поведение их всех было одинаковым, а названные характерные величины отличались у разных диодов не более чем на 1%. Такая идентичность невозможна для естественных микроплазм, поскольку их создают случайные дефекты.

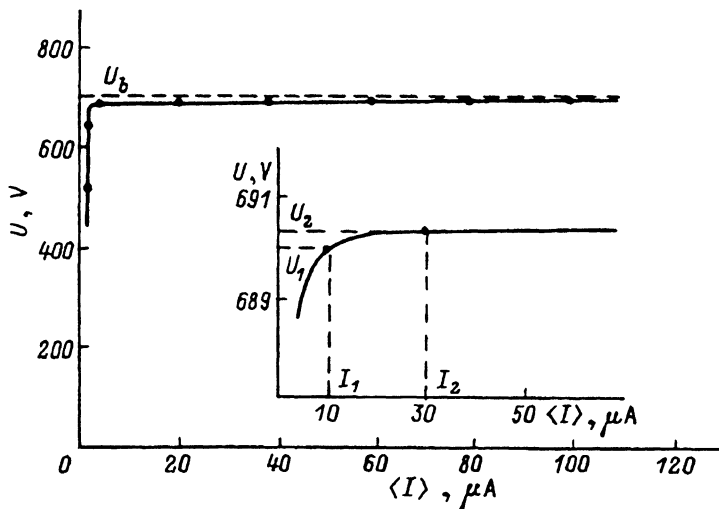


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика диода. На вставке укрупненно показан участок нестабильности тока.

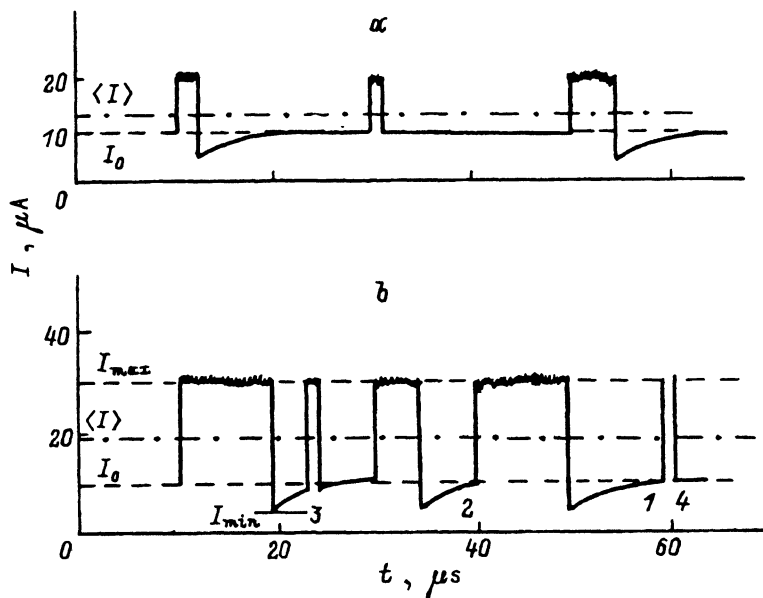


Рис. 2. Осциллограммы хаотически изменяющегося тока при $\langle I \rangle$, равном 10 (а) и 20 мкА (б).

Кроме того, в случае естественной микроплазмы начало роста тока из-за лавинного пробоя $p-n$ -перехода по всей его площади отделено от конца участка хаотического тока интервалом напряжения с линейным ростом тока [1]. На нем напряжение достаточно для стационарного включения микроплазмы, но недостаточно для пробоя перехода вне ее канала. В использованных диодах такой интервал отсутствовал и резкий рост тока начинался сразу после прекращения хаотических колебаний (см. вставку на рис. 1).

3. Из полученных результатов можно сделать некоторые заключения о протекании тока ударной ионизации.

Во время каждого импульса тока в ОПЗ существует лавина. Величина на амплитуды импульса зависит от сопротивления канала лавины, которое в свою очередь зависит от диаметра канала d . Равенство амплитуд всех импульсов говорит о равенстве диаметров каналов всех проходящих лавин.

Уменьшение фонового тока после прохождения длинного импульса до значения I_{\min} , меньше стационарного значения I_0 , естественно объяснить разогревом канала лавины, а последующий медленный рост — остыванием. Считая, что время остывания $\tau = d^2/D_T$, D_T — коэффициент диффузии тепла, находим $d = 30$ мкм. Полученное значение близко толщине ОПЗ l и много меньше диаметра поперечного сечения ОПЗ.

Разогрев канала лавины током I_{\max} может повлиять на фоновый ток только в том случае, если оба тока протекают через один и тот же участок ОПЗ, т. е. фоновый ток локализован в узком канале поперечного сечения ОПЗ и в этом же канале возникают лавины с током I_{\max} . Локализацию фонового тока и возникновение лавин именно в канале его протекания можно объяснить следующим образом.

Фоновый ток формируется ударным размножением в ОПЗ электронов и дырок. Причиной его локализации может быть предсказанное в [3,4] шнурование такого тока, а также обратная связь, при которой случайное возникновение где-либо ударно-ионизированных носителей увеличивает там вероятность последующий ударной ионизации. Эту связь могут обуславливать: разогрев ОПЗ током ударной ионизации; увеличение концентрации дырок в нейтральной n -части перехода высокоэнергетическими электронами, вылетающими из возникшей области ионизации [1]; затягивание электронов в эту область их биполярным дрейфом в поле, которое создает локализованный ток у его выхода в нейтральную p -часть перехода.

Вероятность возникновения лавины в каком-либо участке ОПЗ растет с увеличением частоты попадания в этот участок носителей заряда. Поэтому при протекании фонового тока через канал вероятность возникновения в нем лавин много больше, чем в остальной части ОПЗ. После локализации тока ударной ионизации лавины практически всегда возникают в канале его протекания.

4. Механизм уменьшения тока при разогреве канала требует отдельного обсуждения. По размерам канала было найдено его тепловое сопротивление [1], а затем оценено повышение температуры длинным импульсом тока. Оно оказалось равным 0.6 К. С ростом температуры дрейфовые скорости электронов и дырок, их коэффициенты ударной ионизации, а следовательно, и ток через канал уменьшаются. Однако для 0.6 К такое уменьшение на порядки меньше $(I_0 - I_{\min})/I_0$ и не объясняет полученных данных.

Это можно сделать, используя результаты работ [5,6]. Согласно им, продольный (вдоль направления протекания тока) неоднородный разогрев ОПЗ p - n -перехода включает механизм изменения концентраций носителей заряда и тока ударной ионизации, эффективность которого определяется не самой величиной повышения температуры, а ее градиентом. Последний из-за резкой неоднородности в p - n -переходе

электрического поля может быть весьма значительным даже при малом повышении температуры. В работе [7] описано выключение этим механизмом пробоя естественных микроплазм, а в [8] — тока ударной ионизации в безмикроплазменном переходе.

В работе [8] приведены результаты численного расчета уменьшения тока ударной ионизации механизмом [5,6] для плотности тока и U , близких по порядку величины к реализовавшимся в каналах лавин, наблюдавшихся в настоящей работе. Сопоставление настоящих экспериментов с расчетом [8] говорит о том, что причиной обсуждаемого уменьшения тока может быть неоднородный продольный разогрев канала протекания тока.

В заключение отметим, что возможность возникновения в p - n -переходе хаотических колебаний тока, не связанных с его дефектами, нужно учитывать при прогнозировании надежности приборов с помощью микроплазменных характеристикографов [4].

Список литературы

- [1] И.В. Грехов, Ю.Н. Сержкин. *Лавинный пробой p - n -перехода в полупроводниках* (Л., Энергия, 1980).
- [2] С. Зи. *Физика полупроводниковый приборов* (М., 1984) кн. 1.
- [3] З.С. Грибников. ФТП, 11, 2111 (1977).
- [4] Р.В. Конакова, П. Кордош, Ю.А. Тхорик, В.И. Файнберг, Ф. Штофаник. *Прогнозирование надежности полупроводниковых лавинных диодов* (Киев, Наук. думка, 1986).
- [5] В.Н. Добровольский, А.В. Романов. ФТП, 26, 1361 (1992).
- [6] В.Н. Добровольский, С.Б. Грязнов. ФТП, 26, 1366 (1992).
- [7] В.Н. Добровольский, И.Е. Пальцев, А.В. Романов. ФТП, (предполагается опубликовать).
- [8] В.Н. Добровольский, А.В. Романов, С.Б. Грязнов. ФТП, 29, 1453 (1995).

Редактор В.В. Чалдышев

Currents of individual avalanches in space-charge region of p - n junction

V.N. Dobrovolskii, A.D. Syrykh

State University, 252127 Kiev, the Ukraine