

## УДАРНАЯ ИОНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ И ДЫРОК И ЛАВИННЫЙ ПРОБОЙ В МТДП СТРУКТУРАХ

В. Н. Добровольский, Г. К. Нинидзе, В. Н. Петрусенко

Киевский университет им. Т. Г. Шевченко, Киев, Украина

(Получена 18 сентября 1992 г. Принята к печати 10 января 1993 г.)

В широком диапазоне прикладываемых напряжений исследовались электрофизические свойства структур металл—туннельно-прозрачный диэлектрик—полупроводник на основе *n*-кремния.

Наблюдались и исследованы: ударная ионизация электронов и дырок в сильном поле под краем полевого электрода; возникновение большого тока через структуру, обусловленного этой ионизацией и эффектом внутреннего усиления тока дырок; прекращение тока ударной ионизации, объясненное зарядением окисла горячими дырками лавины, влияние на этот эффект ультрафиолетового облучения; локальный пробой окисла, возникающие при нем микроплазменные колебания тока; ударная ионизация электронов и дырок в области пространственного заряда под всей площадью полевого электрода; лавинный пробой структуры и уменьшение напряжения этого пробоя за счет внутреннего усиления тока дырок.

Ударная ионизация электронов и дырок и лавинный пробой в области пространственного заряда — фундаментальные явления физики полупроводников и полупроводниковых приборов. Их исследованию в *p-n*-переходах посвящено большое количество работ, результаты которых обобщены в ряде обзоров и монографий (см., например, [1]). Протекание этих явлений в структурах металл—диэлектрик—полупроводник (МДП) и металл—туннельно-прозрачный диэлектрик—полупроводник (МТДП) осложняется наличием в них полевого электрода и диэлектрика. Число работ, посвященных исследованию таких объектов, невелико, и соответственно имеется мало сведений о закономерностях протекания в них ударной ионизации и лавинного пробоя. Однако в последнее время эти явления привлекают внимание в связи с возможностью создания с их использованием высокочувствительных фотоприемников на МДП и МТДП структурах (см., например, [2]).

В настоящей статье приведены результаты исследований ударной ионизации и лавинного пробоя в МТДП структурах на окисленном кремнии в широком диапазоне прикладываемых к ним напряжений.

### 1. Исследуемые образцы

Использовались МТДП структуры, изготовленные на поверхности (111) пластин кремния *n*-типа проводимости с удельным сопротивлением  $4.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , с окислом толщиной  $2.4 \text{ нм}$ , измеренной эллипсометрически, и круглыми алюминиевыми полевыми электродами диаметром  $288 \text{ мкм}$ . Некоторые структуры имели еще и дополнительный электрод в виде концентрического кольца шириной  $55 \text{ мкм}$ , окружавшего описанный центральный электрод (рис. 1, кривая 1). Расстояние между краями электродов было  $20 \text{ мкм}$ . Толщина пластины  $250 \text{ мкм}$ , на ее тыльной поверхности втиранием индий-галлиевой пасты был создан омический контакт.

Снимались стационарные вольт-амперные характеристики (ВАХ) структур, исследовалась кинетика импульсов тока  $I$ , протекающего через структуры при

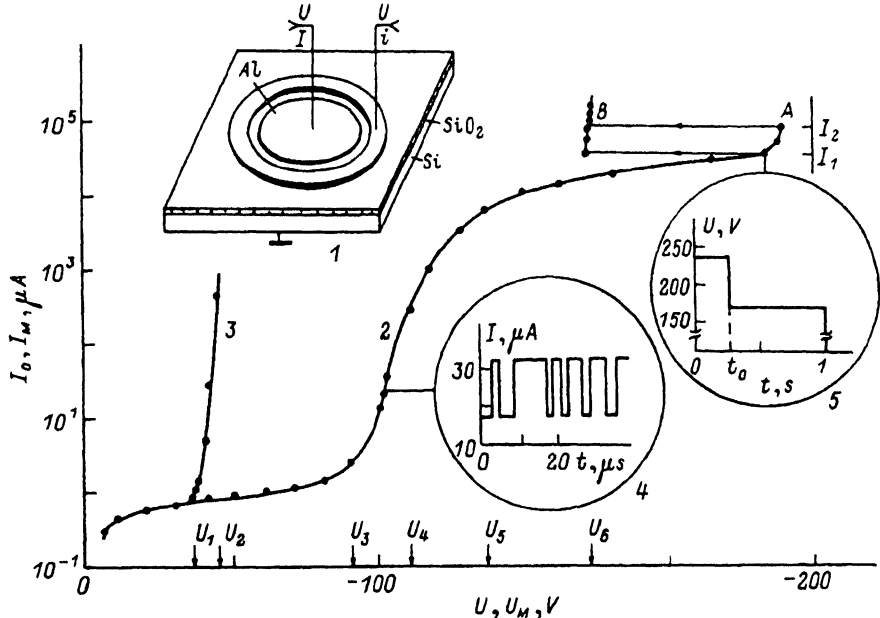


Рис. 1. 1 — МТДП структура; 2 — ВАХ, зависимость  $I_0$  от  $U$ ; 3 — ВАХ, зависимость  $I_M$  от  $U_M$ ; 4 — микроплазменные колебания тока при напряжении  $U = -104$  В; 5 — переход ВАХ с участка А на участок В при протекании через структуру прямоугольного импульса тока  $I = 60$  мА.

приложении к ним прямоугольных импульсов напряжения  $U$  с амплитудой  $U_M$ , а также импульсов напряжения при протекании прямоугольных импульсов тока. Обратная ветвь типичной стационарной ВАХ дается кривой 2 на рис. 1, где  $I_0$  — стационарный ток через центральный электрод,  $U$  — напряжение между этим электродом и контактом на тыльной поверхности пластины.

При действии на структуру прямоугольных импульсов напряжения и тока наблюдался ряд эффектов, характерных для различных интервалов реализовавшегося на структуре напряжения. Значения  $U_1—U_6$  на оси напряжений рис. 1 — границы интервалов. Рассмотрим эти эффекты.

## 2. Нестационарный ток, вызванный ударной ионизацией электронов и дырок под краем полевого электрода

На центральный электрод структуры в обратном направлении ( $U < 0$ ) подавались одиночные прямоугольные импульсы напряжения и регистрировались осциллограммы тока. Если абсолютное значение амплитуды импульса  $|U_M|$  было меньше указанного на рис. 1 значения  $|U_1|$ , то импульсы тока были прямоугольными (рис. 2, кривая 1) и амплитуда была равна значению стационарного тока, даваемого ВАХ (рис. 1, кривая 2) для напряжения  $U = U_M$ . При увеличении скорости развертки в начале и конце импульса тока были видны кратковременные ( $< 10$  мкс) выбросы, связанные с зарядкой и разрядкой емкости структуры. ВАХ, снятая при таком питании структуры, на рассматриваемом участке напряжений совпадала со стационарной.

При  $|U| > |U_1|$  импульсы тока становились колоколообразными (рис. 2, осциллограммы 2—4). Так возрастал, достигал максимума  $I_M$ , а затем уменьшался до значения  $I_0$ , соответствующего стационарной ВАХ 2 на рис. 1. Зависимость  $I_M$  от  $U_M$  дается кривой 3 на рис. 1. Наибольшее значение  $I_M$  превышает стационарный ток более чем на два порядка.

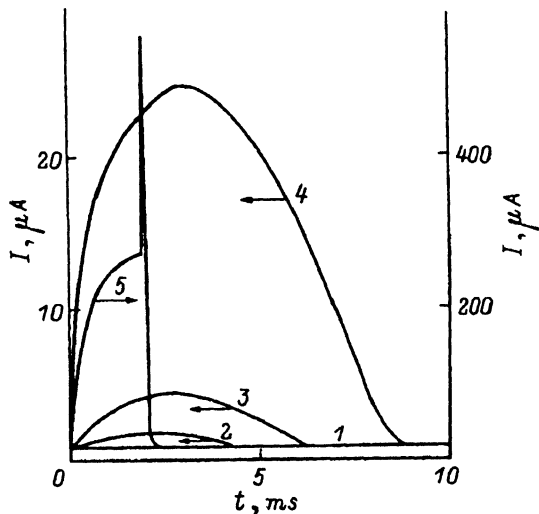


Рис. 2. Осциллограммы тока  $I$  при разных амплитудах импульсов напряжения  $U_M$ , В: 1 — —36, 2 — —38, 3 — —40, 4 — —42, 5 — —44.  $t$  — время.

В случае приложения к структуре одного за другим одинаковых импульсов напряжения, разделенных равными интервалами времени, наблюдалось следующее. Если интервал между импульсами был меньше некоторого времени  $t_m$ , то значение  $I_M$  уменьшалось от импульса к импульсу до величины, соответствующей стационарной ВАХ. При комнатной температуре величина  $t_m$  была около 10 мин, с понижением температуры она возрастала, достигая при 77 К 3 и более.

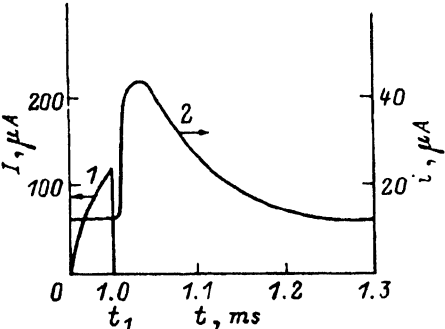
Если интервал между импульсами превышал  $t_m$ , то осциллограммы тока были одинаковыми при всех импульсах напряжения. Величина  $t_m$  представляет собой некое время памяти структурой воздействия на нее импульса напряжения.

Перейдем к объяснению полученных результатов. Известно, что напряженность электрического поля  $\mathcal{E}_k$  на поверхности полупроводника под краем полевого электрода больше напряженности  $\mathcal{E}_0$  на поверхности полупроводника под его центром [3]. Причем отношение  $\mathcal{E}_k/\mathcal{E}_0$  растет с уменьшением отношения  $d/L$ , где  $d$  — толщина диэлектрика, а  $L$  — толщина приповерхностной области пространственного заряда (ОПЗ). В МТДП структурах величина  $\mathcal{E}_k/\mathcal{E}_0$  может достигать экстремально больших для МДП структур значений, поскольку в них — малая толщина диэлектрика, а в режиме неравновесного обеднения — большая толщина ОПЗ [4].

Оценим величину  $\mathcal{E}_k/\mathcal{E}_0$ . В пренебрежении зарядом дырок и зарядом встроенным в диэлектрик, из решения уравнения Пуассона следует  $\mathcal{E}_0 = 2U/L$ . При  $U = U_1$  в использованных структурах  $L = 6$  мкм,  $\mathcal{E}_0 = 1.2 \cdot 10^5$  В/см, а  $d/L = 4 \cdot 10^{-4}$ . Воспользовавшись приведенными в [3] зависимостями  $\mathcal{E}_k/\mathcal{E}_0$  от  $d/L$ , находим, что  $\mathcal{E}_k/\mathcal{E}_0 = 4.7$ , а  $\mathcal{E}_k = 5.7 \cdot 10^5$  В/см. Согласно [1], такая величина напряженности электрического поля достаточна для интенсивной ударной ионизации и лавинного размножения в кремнии электронов и дырок.

Учитывая это, рост тока при его колоколообразном изменении можно объяснить следующим образом. При  $|U| > |U_1|$  под краем полевого электрода в полупроводнике происходит ударная ионизация и появляются неравновесные электроны и дырки. Дырки перемещаются к центру электрода, частично уходят в металл, а частично накапливаются у поверхности полупроводника. Независимые измерения тока через структуру при ее освещении показали, что в ней реализуются условия, необходимые для внутреннего усиления тока [5]. Поэтому накопление дырок приводит к значительному увеличению полного тока через структуру.

Рис. 3. 1 — осциллограмма колоколообразного тока  $I$  через центральный электрод, оборванного в момент времени  $t_1$ ; 2 — ток  $i$  через коллектор. Масштаб на оси времени изменен в точке  $t_1$ .



Рассматриваемая ситуация отличается от описанной в [5] тем, что неравновесные дырки в кремнии возникают не в результате оптической генерации, а из-за наличия ударной ионизации.

Возникновение электронно-дырочных пар в сильном поле у края электрода подтверждено прямым экспериментом. На допустимый кольцевой электрод (рис. 1) подавалось постоянное напряжение  $u = -10$  В, что делало его коллектором дырок. При прерывании в момент  $t_1$  колоколообразного тока  $I$  (рис. 3, осциллограмма 1) выключением поданного на него напряжения  $U$ , на осциллограмме 2 тока  $i$  через коллектор наблюдался всплеск. Он вызван приходом на коллектор возникающих при ударной ионизации дырок. При действии напряжения  $U$  их приход на коллектор затрудняло поле, созданное этим напряжением.

Напряженность поля  $\mathcal{E}_k$  зависит от заряда, встроенного в диэлектрик. Уменьшение со временем тока в колоколообразном импульсе объясняется встраиванием в диэлектрик положительного заряда дырок, возникающих при ударной ионизации. Это уменьшает краевое поле и прекращает ударную ионизацию.

Тот факт, что происходит встраивание в диэлектрик именно положительного заряда, подтверждается зависимостью времени памяти  $t_m$  от напряжения, прилагаемого к центральному электроду в промежутке между двумя импульсами напряжения. Положительное напряжение уменьшало  $t_m$ , а отрицательное — увеличивало его. Например, действие напряжения 1.2 В в течение 1 мин уменьшало  $t_m$  от 10 до 1 мин, а действие в течение 40 мин напряжения  $-5$  В увеличивало  $t_m$  от 10 до 40 мин.

По-видимому, из возникающей при ударной ионизации лавины в окисел встраиваются только горячие дырки. Об этом говорит следующий результат. Через кольцевой электрод в проходном направлении пропускался ток, который инжектировал в полупроводник дырки. При  $|U| = 10$  В, значительно меньшем  $|U_1|$ , дырки создавали ток через центральный электрод, равный или больший максимального тока в колоколе  $I_M$ , т. е. ситуация была подобна реализующейся при возникновении колоколообразного тока, отличаясь от нее чуть меньшей напряженностью поля и отсутствием горячих носителей заряда. В описанных условиях не наблюдалось уменьшения со временем тока, протекающего через центральный электрод.

Встраивание заряда в диэлектрик в общем случае должно изменять вольт-фарадную характеристику структуры. Однако такие характеристики, снятые до и после протекания колоколообразных импульсов тока, практически совпадали между собой, различие составляло не более 5%. Это объясняется малой протяженностью области сильного электрического поля, где происходит встраивание заряда в диэлектрик.

Известно, что облучение окисла структуры ультрафиолетовым светом приводит к встраиванию в него положительного заряда [6]. В соответствии с этим ультрафиолетовое облучение исследуемых структур, при котором свет попадал на открытую поверхность окисла между центральным и кольцевым электродами, увеличивало время  $t_m$ . Например, облучение структуры в течение 1 мин световым потоком  $\sim 1$  Вт/см<sup>2</sup> от лампы ОКН-11 увеличивало  $t_m$  от 10 до 30 мин.

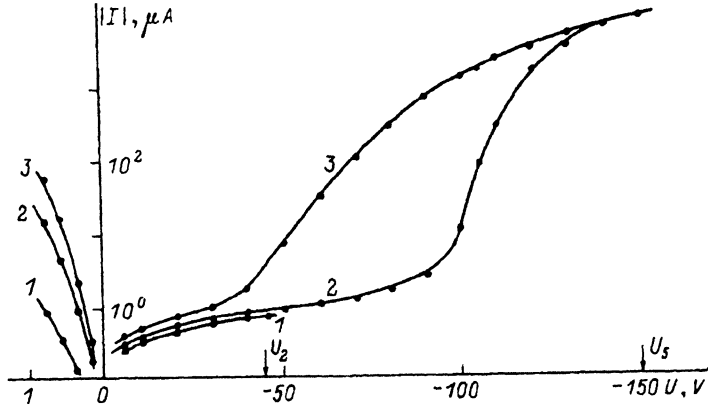


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики одной и той же структуры, снятые последовательно 3 раза. Кривые пронумерованы в порядке проведения измерений.

### 3. Локальный пробой диэлектрика

До значения амплитуды импульса  $U_2$  зависимость  $I_M$  от  $U_M$  (рис. 1, кривая 3) была воспроизводима при условии, что повторные измерения происходили через промежутки времени, большие времени памяти  $t_m$ .

При амплитуде импульса, равной  $U_2$ , наблюдался резкий рост тока  $I$  с последующим спадом до стационарного значения  $I_0$  (рис. 2, осциллограмма 5). После этого необратимо изменялись как прямая, так и обратная ветви стационарной ВАХ структуры и наблюдались только прямоугольные импульсы тока. Кривая 1 на рис. 4 представляет собой стационарную ВАХ, снятую до указанного выше резкого роста тока, т. е. при ее регистрации  $|U| < |U_2|$ . Кривая 2 — результат повторного, начиная с прямого направления, измерения ВАХ после указанного роста тока. Кривая 2 на рис. 1 получена при первом прохождении представленного на рисунке интервала напряжений от нуля до максимального значения  $|U|$ .

Резкий рост тока со временем и необратимое изменение после этого свойств структуры можно объяснить локальным пробоем диэлектрика, при котором в нем образуется проводящий канал. Уход в металл через этот канал дырок устраняет внутреннее усиление и связанное с ним колоколообразное изменение тока. Кроме того, согласно [7], где описан подобный пробой, этот канал увеличивает инжекционную способность алюминиевого полевого электрода и ток в прямом направлении.

Вольт-фарадные характеристики, снятые до и после пробоя окисла, совпадали с точностью лучше 5%, что свидетельствует о малом сечении канала, почти не изменяющего площадь ОПЗ под полевым электродом. В интервале напряжений от  $U_2$  до отмеченного на рис. 1 значения  $U_3$  не наблюдалось поступления дырок на коллектор.

Начиная с  $U_3$  (рис. 1), стационарный ток резко возрастал с увеличением напряжения  $|U|$ , а при его выключении возникал обусловленный приходом дырок всплеск тока через коллектор. Его амплитуда росла по мере увеличения  $|U|$ .

Постоянное напряжение  $|U| > |U_4|$  разогревало структуры вплоть до разрушения. В этом случае измерения проводились только при подаче на структуры одиночных импульсов.

На некоторых структурах при постоянном  $U$  наблюдались хаотические колебания тока (рис. 1, осциллограмма 4). Такие колебания характерны для начальной стадии микроплазменного пробоя, когда в ОПЗ с малой концентрацией электронов и дырок их случайные попадания в канал с малым диаметром и

большой напряженностью электрического поля вызывают протекание кратковременных импульсов лавинного тока ударной ионизации [1].

Если при измерении какой-либо ВАХ реализовалось напряжение  $|U|$ , большее значения  $|U_3|$ , то повторно снимаемая после этого ВАХ располагалась выше предыдущей. Этот подъем ВАХ происходил до тех пор, пока не достигалась некая неизменная ВАХ. Такая ВАХ на рис. 4 показана кривой 3; ВАХ 1 на этом рисунке снята первой, 2 — второй.

Начиная с напряжения  $U_5$ , указанного как на рис. 1, так и на рис. 4, все ВАХ сливались в одну.

Резкий рост тока в интервале напряжений  $U_3—U_5$  можно объяснить возникновением в этом интервале ударной ионизации электронов и дырок в ОПЗ под местами локального пробоя окисла. Причем число таких мест множится во время снятия ВАХ. Поэтому при последующих измерениях ВАХ смещаются вверх. Неизменной ВАХ соответствует пробой всех слабых мест окисла.

#### 4. Лавинный пробой ОПЗ по всей площади

Начиная с  $U_5$ , ВАХ структур воспроизводимо повторялись. Причем для  $|U| > |U_6|$  при постоянном напряжении ток нарастал со временем и в случае, если импульс своевременно не прерывался, структура разрушалась. В связи с этим измерения при напряжениях  $|U| > |U_6|$  осуществлялись таким образом, что через структуры пропускались прямоугольные импульсы тока и снимались осциллограммы напряжения.

До указанного на рис. 1 значения тока  $I_1$  импульсы напряжения были прямоугольными. При больших токах осциллограмма существенно изменялась (рис. 1, осциллограмма 5). По истечении времени  $t_0$  напряжение скачком уменьшалось и происходил переход с участка *A* вольт-амперной характеристики на участок *B*. С ростом тока время  $t_0$  уменьшалось и при значениях тока больших  $I_2$ , обращалось в нуль.

Для всех  $|U| > |U_5|$  по окончании импульса напряжения (тока) на центральном электроде наблюдался значительный всплеск тока коллектора, обусловленный приходом на него дырок. Причем после перехода с участка вольт-амперной характеристики *A* на участок *B* его величина увеличивалась в 2—3 раза.

Поведение структуры при  $|U| > |U_5|$  можно объяснить следующим образом. Оценки по вышеприведенным формулам показывают, что при  $|U| > |U_5|$  у поверхности полупроводника под всей площадью полевого электрода реализуется напряженность поля, ббльшая  $2 \cdot 10^5$  В/см, которая достаточна для интенсивной ударной ионизации электронов и дырок в кремнии. Ударная ионизация электронов и дырок по всей площади ОПЗ нивелирует связанную с локальными пробоями окисла планарную неоднородность электрического поля. По этой причине, несмотря на невоспроизводимость ВАХ при  $|U| < |U_5|$ , результаты измерений при больших напряжениях воспроизводимо повторяются.

С ростом  $|U|$  и соответственно темпа ударной ионизации в ОПЗ структуры наступает лавинный пробой. Теория такого пробоя в МТДП структуре развита в работе [8], согласно которой связь между токами дырок и электронов, имеющая место в структурах с внутренним усилением тока приводит к дополнительному увеличению числа электронов в области ударной ионизации, что уменьшает напряжение пробоя. В этом случае напряжение пробоя определяется не как обычно [1] условием  $J-1$ , а условием  $MJ-1$ , где  $J$  — интеграл ионизации,  $M$  — коэффициент внутреннего усиления тока.

Исходя из этого, скачок напряжения в момент  $t_0$  (рис. 1, осциллограмма 5) и скачкообразный переход с участка *A* на участок *B* вольт-амперной характеристики можно объяснить следующим образом. При пропускании через структуру достаточно большого тока в ней возникает лавинный пробой и первоначально

устанавливается напряжение, соответствующее участку  $A$  вольт-амперной характеристики. Накопление за промежуток времени  $t_0$  у поверхности полупроводника, возникающих при лавинном пробое дырок, увеличивает коэффициент  $M$  и уменьшает напряжение пробоя. При этом происходит скачок напряжения на осциллограмме и соответственно перескок с ветви  $A$  на ветвь  $B$  вольт-амперной характеристики.

Из условия  $NJ-1$  получено, что для наблюдавшегося уменьшения напряжения пробой от 235 до 175 В коэффициент  $M$  должен увеличиться от 1.1 до 1.8. В связи с предложенным объяснением дополнительно заметим, что разогрев структуры, увеличивая темп генерации электронно-дырочных пар (за счет термогенерации), приводил к уменьшению времени  $t_0$ . Так, например, увеличение температуры на 10 К уменьшало  $t_0$  от 0.4 до 0.3 с.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] И. В. Грехов, Ю. П. Сержкин. Лавинный пробой  $p-n$ -перехода в полупроводниках. Л. (1980).
- [2] А. Я. Вуль, А. Т. Дидейкин, С. В. Козырев. В кн.: Фотоприемники и фотопреобразователи (под ред. Ж. И. Алфёрова, Ю. В. Шмарцева), 105. Л. (1986).
- [3] A. Rusu, C. Bulucea. IEEE Trans. Electron. Dev., ED-26, 201 (1979).
- [4] R. A. Clark, J. Shewchun. Sol. St. Electron., 14, 957 (1971).
- [5] M. A. Green. J. Shewchun. Sol. St. Electron., 17, 349 (1974).
- [6] И. И. Лисовский, А. М. Фонкич. Поверхность. Физика, химия, механика, 1, 59 (1989).
- [7] В. И. Бережной, В. Н. Добровольский, С. Т. Жубаев, Г. К. Нинидзе, Н. П. Федосеев. Микроэлектроника, 15, 271 (1986).
- [8] В. Н. Добровольский, Г. К. Нинидзе, В. Н. Петрусенко. Письма ЖТФ, 18, 73 (1992).

Редактор Л. В. Шаронова

---