

УДК 537.5;539.074

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ МИКРОСТРИПОВЫХ ЭЛЕКТРОДОВ К БОМБАРДИРОВКЕ ИОНАМИ АРГОНА

М. А. Негодаев, В. А. Чечин, В. М. Гришин, Б. Н. Ломоносов, А. В. Багуля

Пластина боросиликатного стекла с хромовой микростриповой структурой облучалась медленными (~ 10 эВ) ионами аргона, образованными вследствие ионизации остаточного газа пучком ионов неона с энергией 10 кэВ. При полном собранном заряде на единицу длины 30 мКл/см наблюдалось частичное разрушение кромок микрострипов.

В планируемых экспериментах по физике высоких энергий детекторы элементарных частиц должны, не изменяя существенно своих рабочих характеристик в течение нескольких лет, работать в довольно жестких радиационных условиях. Старение или необратимые изменения рабочих характеристик детектора под действием радиации являются наиболее серьезной проблемой для микростриповых газовых камер (МСГК) и в настоящий момент интенсивно изучаются экспериментально.

Систематические исследования старения МСГК под действием радиации проводились различными группами с использованием МСГК, изготовленных на подложках из различных материалов и в различных рабочих условиях. При оптимальных рабочих параметрах была продемонстрирована длительная стабильность без деградации рабочих свойств МСГК вплоть до собранного заряда ~ 100 мКл/см, что соответствует (при числе электронов в лавине $2 \cdot 10^5$) радиационной дозе ~ 10 Мрад для минимально ионизирующих частиц или более чем 10 годам работы ЛНС при максимальной светимости [1 - 4].

Однако группой ЦЕРНа было обнаружено, что при использовании подложек из боросиликатного стекла при высоких загрузках старение наблюдается при значительно более низких значениях собранного полного заряда на единицу длины стрипов [2]. Точный механизм такого поведения не ясен, и эти наблюдения опровергают проведенные ранее исследования по старению МСГК.

Старение МСГК связывается, в первую очередь, с рождением в лавинах полимерных соединений, сорбция которых в электродах и изоляторах между стрипами приводит к увеличению тока утечки и пробоям, вызывающим разрушение структур МСГК.

Большинство экспериментов по изучению старения МСГК было проведено при облучении детектора высокоинтенсивным потоком рентгеновских лучей или на ускорителях, причем во всех экспериментах в качестве нормализующего фактора использовалась величина полного собранного заряда на единицу длины стрипов. Они показали, что тщательный отбор рабочего газа и материалов, используемых при изготовлении МСГК, значительно увеличивает время работы детектора в высокорadiационных условиях [5, 6]. При этом наряду с чистотой газовой системы доминирующими факторами являются материал подложки и металл, используемый для стрипов [7 – 9].

Одним из механизмов, который может влиять на длительность работы МСГК, является бомбардировка катодных стрипов и подложки ионами рабочего газа, образованными в лавине в процессе газового усиления. Как уже отмечалось, МСГК должны работать без изменения своих свойств вплоть до собранного заряда $\sim 100 \text{ мКл/см}$. При этом на каждый сантиметр катодного стрипа (толщиной $0,1 \text{ мкм}$), содержащий 10^{16} атомов материала, из которого он изготовлен, попадает 10^{18} ионов рабочего газа. С этой точки зрения большой интерес при выборе материала для электродов, подложки или полупроводниковых покрытий [10] для них представляет стойкость этих материалов к бомбардировке ионами рабочего газа.

Бомбардировка твердых веществ потоками ионов, атомов и ядер атомов сопровождается очень сложными процессами. Поток ионов, приблизившись к поверхности твердого тела, "вырывает" из него электроны и превращается в поток быстрых атомов. Сталкиваясь с атомами поверхностного слоя, часть потока атомов рассеивается, изменяя направление своего движения, и отражается от поверхности. Некоторые налетающие атомы выбивают (распыляют) атомы поверхностного слоя вещества. Разрушение твердых тел под действием ионной бомбардировки впервые наблюдалось как разрушение катода в газовом разряде, поэтому до недавнего времени оно было известно как "катодное распыление".

При бомбардировке твердых тел химически активными ионами распыление происходит не только под действием физических механизмов распыления, но также и вследствие образования летучих химических соединений (гидридов и галогенидов).

Процесс распыления твердых веществ ионами характеризуется коэффициентом распыления, равным числу выбитых атомов, приходящихся на один ион (ат./ион).

и скоростью распыления, определяемой толщиной слоя вещества, удаляемого в единицу времени ($см/с$). Коэффициент распыления зависит от энергии, заряда, массы иона, угла его падения на поверхность, дозы ионов, заряда ядра, массы, энергии связи атома мишени, кристаллического строения, загрязнения поверхности окислами и пленками, шероховатости и пористости образца, природы остаточного газа и его давления, температуры образца и некоторых других условий бомбардировки [11].

Процесс распыления начинается, когда энергия ионов превысит пороговую энергию распыления. С помощью весьма чувствительных методов измерения коэффициента распыления в работе [12] авторы экспериментально установили, что при энергии ионов $3 - 30$ эВ коэффициент распыления составляет $10^{-4} - 10^{-5}$.

Пороговая энергия распыления W_{th} зависит от массы иона и атома, энергии связи атома с поверхностью твердого тела, которая определяется теплотой возгонки вещества. По экспериментальным данным величина W_{th} колеблется от единиц до сотен электронвольт. В процессе ионной бомбардировки вследствие распыления, дефектообразования, имплантации ионов и атомов отдачи меняются элементарный состав и структура поверхности: происходит обогащение поверхности определенным элементом, кристаллизация или аморфизация поверхностного слоя. Изменение поверхностного рельефа при ионной бомбардировке включает несколько стадий: 1) возникновение дефектов (вакансий, межузельных атомов, дислокаций); 2) появление микроскопических неоднородностей размерами $10 - 100$ нм (линии травления, конические или пирамидальные выступы, границы зерен); 3) образование неоднородностей макроскопических размеров порядка долей микрона.

В настоящей работе стойкость микростриповой структуры относительно бомбардировки медленными ионами исследовалась с помощью установки "ГЕЛИС" [13] (рис. 1).

Микростриповая структура с шагом 200 мкм, изготовленная методом электронной литографии по Cr на стекле D-263 фирмы DESAG, была помещена в камеру установки "ГЕЛИС" параллельно пучку на расстоянии $d \sim 10$ см от его оси. В камеру подавался газ Ar, давление которого поддерживалось на уровне $p \sim 7 \cdot 10^{-2}$ торр. Напряжение $U_c = -175$ В подавалось на 6 катодных стрипов; аноды и остальные катоды МСГК находились под плавающим потенциалом. Перед структурой располагалась пластинка из фторопласта с окном размером 10×30 мм², тем самым задавалась длина катодных стрипов, подвергаемых бомбардировке медленными ионами. Суммарная длина стрипов, на которые собирались ионы, составляла 6 см. При этом собираемый ионный ток не

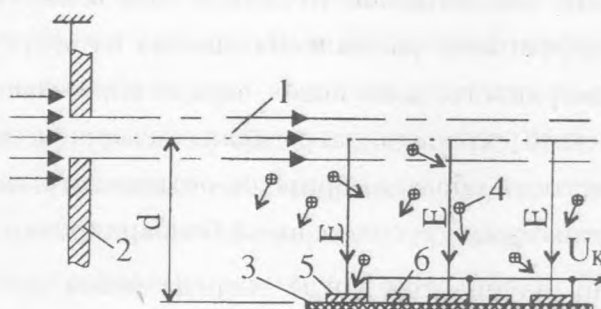


Рис. 1. Схема использования установки "ГЕЛИС" при изучении влияния бомбардировки медленными ионами катодов МСГК: 1 - пучок ионов Ne^+ ; 2 - диафрагма камеры дифференциальной откачки диаметром 3 мм; 3 - пластина МСГК; 4 - медленные ионы Ar^+ ; 5 - катодные стрипы.

превышал 10 мкА.

Такая схема эксперимента позволяет смоделировать условия, при которых средняя энергия, приобретаемая в процессе дрейфа ионов, образованных в рабочем газе при ионизации его пучком в установке "ГЕЛИС", близка к средней энергии ионов, образованных в рабочем газе МСГК в процессе газового усиления.

Действительно, ионы, образовавшиеся в газе вблизи анода МСГК, дрейфуют к катоду под влиянием неоднородного электрического поля, которое возникает при подаче потенциала на катодные стрипы структуры.

Точную картину движения ионов можно получить, решив кинетическое уравнение для заданной конфигурации стрипов и поля. Сделаем здесь лишь качественную оценку для величины W - характерной энергии, с которой ионы бомбардируют катод: эта величина важна для исследований радиационной стойкости стрипов.

Характер движения ионов между анодом и катодом определяется соотношением между длиной свободного пробега λ ионов между столкновениями и расстоянием d между анодом и катодом (зазором). Если $\lambda \ll d$, то имеет место дрейф ионов в электрическом поле, которое изменяется вдоль направления дрейфа; если же $\lambda \gg d$, то происходит непрерывное ускоренное движение ионов. В камере, наполненной аргоном при нормальных условиях, $\lambda_0 = 0,1$ мкм; следовательно, если $d \sim 50$ мкм, то ион испытывает около 500 столкновений и движение его к аноду имеет безусловно характер дрейфа.

Известно, что при наличии электрического поля распределение дрейфующих ио-

нов по энергиям остается максвелловским, причем скорость дрейфа при полях порядка 10^5 В/см $V_d = \mu E/p$, где μ (см²/В·с) – подвижность ионов, E (В/см) – напряженность электрического поля, p (атм) – давление. Для аргона $\mu = 1,7$ см²/В·с. Эта формула обычно применяется для однородного поля, но, поскольку в данном случае $\lambda \ll d$, ее можно использовать и в неоднородном поле в зазоре на расстояниях много больших λ . Характерная величина поля в зазоре $E = 500\text{В}/50\text{мкм} = 10^5$ В/см, поэтому для аргона $V_d = 1,7 \cdot 10^5$ см/с, что отвечает энергии $W_d = 40 \cdot 0,938 \cdot 10^9 \text{эВ} \cdot (V_d/c)^2/2 = 0,6$ эВ. Это значение можно взять в качестве минимальной оценки величины W . Для получения максимальной оценки W необходимо учесть, что вблизи краев катода электрическое поле и, следовательно, скорость дрейфа возрастает; здесь поле определяется кривизной поверхности. В данном случае $E(r) \simeq U_0/[r \ln(d/R_c)]$, где U_0 – разность потенциалов, R_c – радиус закругления края катода, значение которого зависит от технологии изготовления микростриповой структуры. Максимальную энергию ион может набрать, ускоряясь в поле на расстоянии λ непосредственно перед падением на катод. Интегрируя $E(r)$ в пределах $[R_c, \lambda + R_c]$ и полагая $R_c = 0,1$ мкм, получим максимальную оценку $W_{max} = 56$ эВ.

Следовательно, приведенные выше оценки показывают, что энергия, с которой ионы аргона бомбардируют катод МСГК, может достигать десятков электронвольт.

При уменьшении давления рабочего газа длина свободного пробега электронов возрастает ($\lambda = \lambda_0/p$), однако, если выполняется условие $d \gg \lambda$, то для оценки напряжения U_c , подаваемого на катоды МСГК при моделировании условий их бомбардировки по предложенной схеме, можно воспользоваться уравнением $V = \mu U_c/dp$.

После ~ 11 часов экспозиции, когда полный собранный заряд Q на единицу длины стрипа (1 см) составил 30 мКл, пучок был выключен, а результат воздействия ионов Ar на катоды МСГК исследовался под микроскопом. На рис. 2 приведена фотография участка одного из катодов микростриповой структуры, на которые подавалось напряжение $U_c = -175$ В. На ней хорошо видны вызванные бомбардировкой катодов ионами Ar⁺ дефекты, которые проявляются в виде рваных краев катодных стрипов и их частичного распыления.

Таким образом, на основании приведенных выше оценок и в результате эксперимента по облучению микростриповых структур потоком ионов аргона можно заключить, что при длительной работе МСГК с электродами толщиной $\sim 0,1$ мкм и газовыми смесями, содержащими в качестве основного компонента аргон, одним из вероятных механизмов, способствующих разрушению стрипов МСГК, может быть механизм катод-

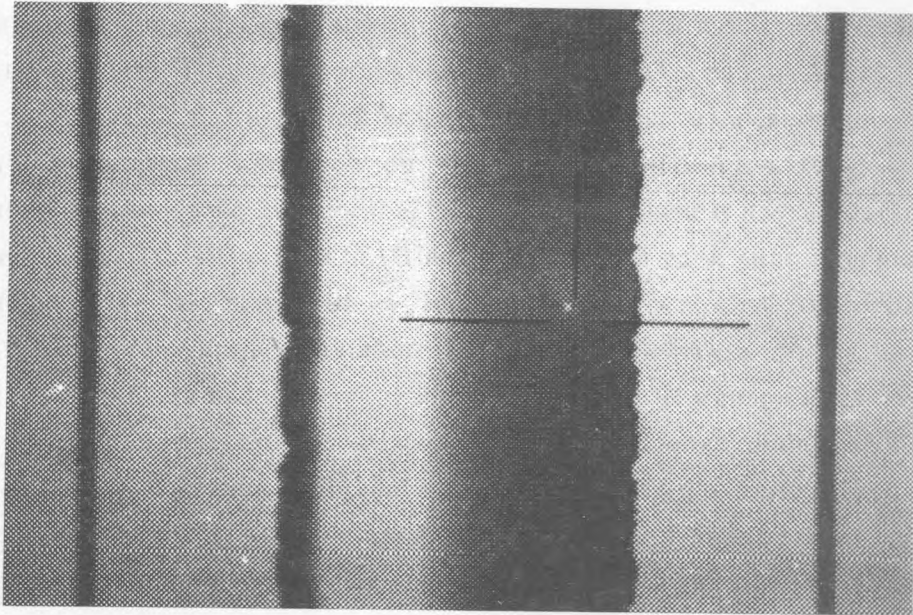


Рис. 2. Участок катода, подвергшийся бомбардировке ионами аргона. Видны частичное разрушение кромок и область полного распыления трома. Узкие темные полосы – аноды, на которые потенциал не подавался.

дногo распыления. Действительно, при толщине электродов $\sim 0,1$ мкм напряженность поля у катода настолько велика, что энергия бомбардирующих ионов может превышать пороговую энергию распыления материала электродов. В результате ионного распыления катодов по их кромке образуются острия, которые могут стать причиной газового пробоя в промежутке катод-анод микростриповой структуры и выхода МСГК из строя.

Очевидно, что стойкость катодных стрипов МСГК к бомбардировке медленными ионами зависит от материала микрострипов, подложки, метода нанесения металлического покрытия, состава рабочего газа и рабочих параметров камеры. Ясно, что для уменьшения скорости распыления желательно использовать более легкие газы, увеличить толщину электродов, а в качестве материалов использовать металлы с малым коэффициентом катодного распыления.

Исследования влияния этих факторов за реально достижимое время крайне важны для оптимизации параметров и выбора материалов при изготовлении МСГК. Предложенная схема позволяет сократить время облучения структур МСГК медленными ионами за счет увеличения потока медленных ионов в исследуемую область.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bouclier R. et al. Nucl. Instr. Meth., **A332**, 100 (1993).
- [2] Bouclier R. et al. Nucl. Instr. Meth., **A367**, 168 (1995).
- [3] Bateman J. E. et al. RAL-94-114 (1994).
- [4] Salomon M. et al. TRI-PP 94-24 (1994).
- [5] Bouclier R. et al. CERN-PPE/96-033 (1996); Nucl. Instr. Meth. (in press).
- [6] Bouclier R. et al. Nucl. Instr. Meth., **A348**, 109 (1994).
- [7] Smirnova L. N., Zhukov V. Yu. INP MSU 96-38/445 (1996); Van der Berg F. D. et al. NIKHEF/95-069 (1995).
- [8] Bouclier R. et al. Proc. IEEE Nucl. Sci. Symp., San Francisco 1995.
- [9] Bateman J. E. et al. RAL-95-032 (1995).
- [10] Bagulya A. V. et al. Nucl. Instr. Meth., **A374**, 278 (1996).
- [11] Габович М. Д. и др. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. М., Энергоатомиздат, 1986.
- [12] Плешивцев Н. В. Катодное распыление. М., Атомиздат, 1968.
- [13] Негодаев М. А., Багуля А. В. Препринт ФИАН N 11, М., 1996.

Поступила в редакцию 27 января 1997 г.