

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬ ДЛЯ ТРЕКОВОГО ДЕТЕКТОРА

ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

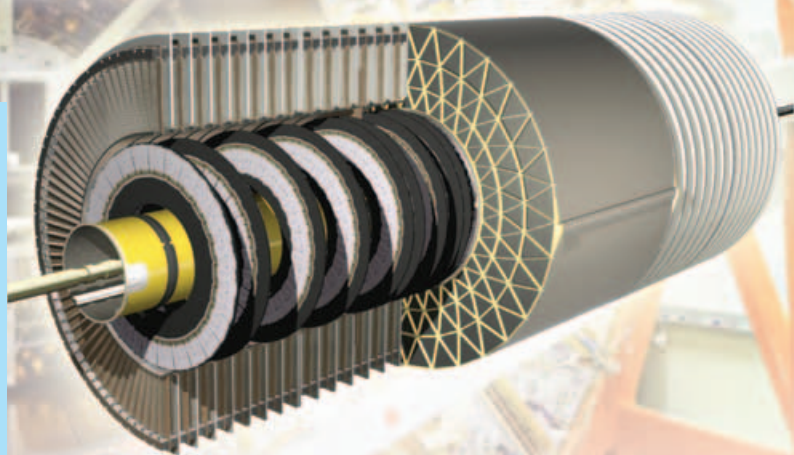
На кафедре микроэлектроники МИФИ разработан высоковольтный предохранитель, предназначенный для электрической защиты трековых детекторов переходного излучения. Сегодня предохранитель успешно используется в эксперименте ATLAS (CERN, Швейцария). Устройство может также найти применение в низковольтных детекторных системах, например в микрополосковых кремниевых детекторах.

НЕОБХОДИМОСТЬ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

В современных экспериментах по физике высоких энергий часто применяют трековые детекторы переходного излучения (ТДПИ). Они представляют собой набор из тысяч длинных тонких трубок, получивших название *straw* (англ. "соломинка"). Straw-трубки изготовлены из полимерной пленки и наполнены смесью инертных газов (аргон, ксенон) с различными молекулярными примесями [1–5]. На внутреннюю поверхность straw-трубки нанесен проводящий слой, служащий катодом. На него подается напряжение в несколько киловольт. В качестве анода используется нить из позолоченного вольфрама или бериллиевой бронзы диаметром ~30 мкм. Длина straw-трубок варьируется от 450 до 1200 мм, диаметр – от 4 до 7,5 мм, а толщина стенок составляет от 60 до 120 мкм. В ТДПИ straw-трубки объединяют, как правило, в группы по восемь штук.

Особенность ТДПИ в том, что в процессе эксперимента он недоступен по причине большой остаточной радиоактивности, наведенной при работе в высокоинтенсивных пучках релятивистских частиц. Как следствие, текущий ремонт или замена элементов ТДПИ невозможны. В то же время, например, в эксперименте ATLAS (CERN, Швейцария) используется около 450 тыс. straw-трубок, и любая из них может выйти из строя. Наиболее характерны две неисправности straw-трубок: обрыв анода и сильное смещение анода от центра катода.

Первая неисправность приводит к прогоранию стенки трубки и истеканию наполняющих ее газов. Это может выве-



А.Симаков

сти из строя большую часть ТДПИ, а также высоковольтные источники питания. При второй неисправности straw-трубка вырабатывает ложные сигналы. В обоих случаях следует быстро отключить аварийную группу трубок от высокого напряжения. После отключения неисправный элемент детектора не способен регистрировать элементарные частицы и излучения, но в целом работоспособность ТДПИ сохраняется.

Для аварийного отключения неисправных элементов детектора необходимы высоковольтные предохранители. Анализ конструктивных особенностей и характеристик ТДПИ, источников высоковольтного питания и условий их применения позволил сформулировать технические требования к таким предохранителям:

- предохранитель должен работать как нагрузочное сопротивление при рабочих токах около 30 мкА и иметь активное сопротивление $R = 91 \pm 10$ кОм;
- один предохранитель ставится на группу из 8 straw-трубок, один высоковольтный источник обеспечивает работу 64 трубок (8 групп по 8 штук в каждой);
- размеры предохранителя не должны превышать 5 · 2 · 3 мм;
- предохранитель должен быть устойчив к случайным искровым разрядам в трубках, вызванным, например, наличием пылинок в газовой смеси во внутреннем объеме трубки детектора;
- должна быть обеспечена возможность пережигания предохранителя внешним устройством в случае обнаружения дефектной трубки;

- предохранитель должен иметь сопротивление в "сгоревшем" состоянии не менее 200 ГОм с током утечки не более 10 нА;
- время перегорания предохранителя в случае короткого замыкания анод-катод не должно превышать 50 мс – в этом случае не повреждаются стенки трубки;
- предохранитель должен обладать высокой радиационной стойкостью – не менее 10^6 рад.

Тонкопленочный высоковольтный предохранитель, отвечающий всем указанным требованиям, разработан на кафедре микроэлектроники МИФИ и получил условное обозначение HVF (High Voltage Fuse). Обладая уникальными характеристиками, он не имеет прямых аналогов и изначально проектировался для использования в эксперименте ATLAS. Однако в настоящее время проводятся исследования по модернизации технологии его изготовления. Цель исследования – выявить возможности применения подобных защитных устройств в низковольтных детекторных системах, например в микрополосковых кремниевых детекторах.

КОНСТРУКЦИЯ И МАТЕРИАЛЫ

Основу предохранителя составляют полированная пластина (чип), изготовленная из ниобата лития (LiNbO_3), размерами $5 \cdot 3 \cdot 1$ мм, и нанесенная на нее фотолитографическим способом полоска титана шириной 15 мкм и общей длиной 9,5 мм с контактными площадками из алюминия (рис. 1, 2).

Чип закрыт крышкой из ситалла, придающей предохранителю механическую прочность (см. рис. 1). Между крышкой и чипом присутствует воздушный зазор толщиной 50–100 мкм, который служит для пережигания титановой полоски. Предохранитель имеет двойную герметизацию – его края покрыты акриловым герметиком. Сопротивление корпуса предохранителя – более 10^{12} Ом, что обеспечивает ток утечки не более 1 нА при рабочем напряжении 1600 В. Контактные выводы предохранителя, изготовленные из посеребренной медной проволоки диаметром 0,25 мм, приклеены эпоксидной смолой к крышке. Золотая проволока диаметром 30 мкм, которая соединяет контактные площадки чипа с контактными выводами предохранителя, приваривается с помощью стандартного оборудования для сборки интегральных схем.

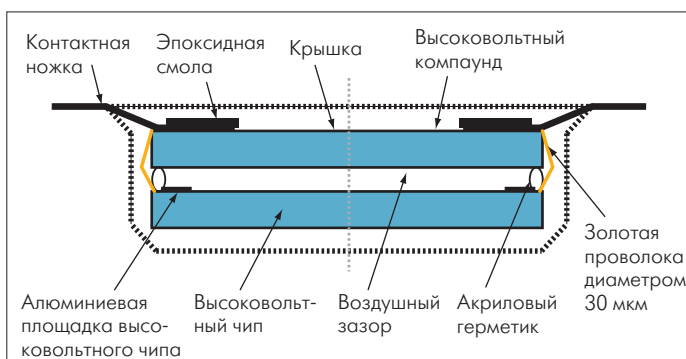


Рис. 1. Схематический разрез высоковольтного предохранителя

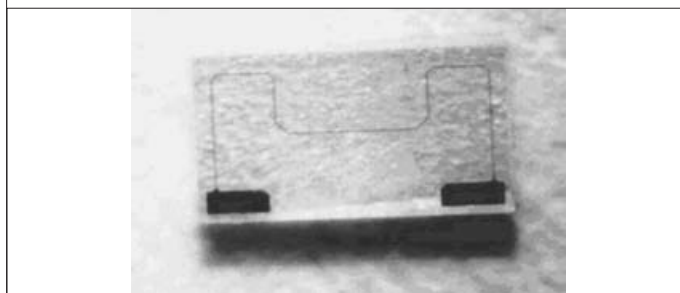


Рис. 2. Микрофотография высоковольтного чипа

В качестве диэлектрической подложки в гибридной технологии используются различные материалы – лейкосапфир, поликор, ниобат лития и др. Количество теплоты Q , выделяющееся при прохождении электрического тока через проводящую полоску, разделяется на две части (теплообменом с воздухом можно пренебречь):

$$Q = Q_T + Q_n, \quad (1)$$

где Q_T – количество теплоты, идущее на нагрев полоски, Q_n – количество теплоты, рассеиваемое в подложке. Величина Q_n зависит от коэффициента теплопроводности материала подложки. Из перечисленных материалов наименьшую теплопроводность имеет ниобат лития. При использовании ниобата лития Q_T и Q_n связаны соотношением

$$Q_T \gg 16 \cdot Q_n. \quad (2)$$

Иными словами, большая часть теплоты, выделяемой при прохождении электрического тока через титановую полоску, расходуется на нагрев самой полоски, а не подложки. Надежное пережигание предохранителя с ниобат-литиевой подложкой происходит при воздействии импульса напряжения величиной 1600 В (ток через предохранитель при этом составляет порядка 15–18 мА) в течение 10–40 мс. Ток утечки через пережженный предохранитель не превышает 1–2 нА при напряжении 2000 В. Предохранители, выполненные на лейкосапфире или поликоре при тех же параметрах импульса, перегорают за несколько секунд или не перегорают вообще.

Титан выбран в качестве материала для токовой полоски предохранителя благодаря своей технологичности и хорошей адгезии к ниобату лития. Высокое поверхностное сопротивление (100 кОм) пленки титана позволяет получить требуемые номиналы сопротивления предохранителя на малых размерах подложки. Кроме того, в результате отжига предохранителя на воздухе при температуре около 300°C на поверхности титана формируется тонкая изолирующая пленка TiO_2 , которая защищает титановую полоску от химического воздействия среды в диапазоне эксплуатационных температур (0 – 100°C).

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРЕДОХРАНИТЕЛЕ

Используя формулы (1) и (2), а также известные параметры материалов подложки и проводящей полоски, можно при-



Рис.3. Внешний вид полоски титана после пережигания

ближенно оценить температуру полоски при прохождении тока порядка 15 мА в течение 20 мс – параметрах, характерных для момента пережигания. Согласно расчетам, за время токового импульса температура титановой полоски повышается приблизительно до 860°C, что значительно ниже температуры сублимации титана (около 1650°C). Такое несоответствие имеет следующее объяснение. Тонкая пленка TiO₂, образующаяся при отжиге предохранителя, надежно защищает полоску Ti от внешних химических воздействий, включая окислительный процесс, до температуры приблизительно 650–700°C [6]. При превышении данной температуры скорость окисления экспоненциально возрастает. На небольшом участке полоски, имеющем геометрические или структурные неоднородности, происходит сквозное проокисление Ti, и полоска в этом месте теряет проводящие свойства. В результате на данном участке резко возрастают сопротивление и падение напряжения. Возникающее электрическое поле высокой напряженности вызывает два разрушающих титановую пленку процесса: искровой разряд и механические повреждения, которые хорошо видны в микроскоп (рис.3). Механические разрушения обусловлены тем, что ниобат лития является хорошим пьезоэлектриком, в котором электрическое поле высокой напряженности приводит

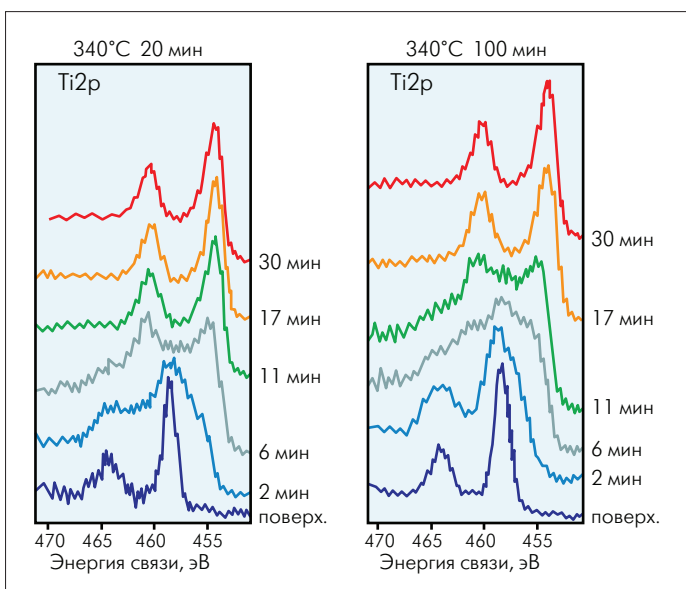


Рис.4. Послойные рентгеновские фотоэлектронные спектры тонкопленочной полоски предохранителя после стандартной технологической термообработки

* Справа от графиков указано время травления

к сильным поверхностным механическим напряжениям и деформациям.

Далее опишем, какую роль играет воздушный зазор между крышкой и высоковольтным чипом (см. рис.1). Находящийся в зазоре атмосферный кислород обеспечивает быстрое протекание окислительного процесса и последующего разрушения токопроводящей полоски. Эксперименты показывают, что в условиях вакуума ~10⁻² Торр длительность пережигания в десятки раз больше, чем на воздухе, а токи утечки существенно возрастают.

Структура и химический состав токопроводящей полоски при различных режимах термообработки исследовались с помощью методики рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) (x-ray photoelectron spectroscopy – XPS) [7]. Исследования проводились на электронном спектрометре XSAM-800 производства фирмы Kratos. Спектры снимались с поверхности после ее послойного травления ионами Ar с энергией 2,5 кэВ при давлении 10⁻⁶ Торр. Средняя скорость травления составляла ~5 Å/min.

На рис.4 показаны послойные рентгеновские фотоэлектронные спектры токопроводящей полоски после операции стандартного отжига в течение 20 и 100 мин при температуре 340°C. Спектры возбуждались излучением MgKα с энергией 1253,6 эВ. Регистрировались линии Ti2p и O1s. Линии Ti2p представляют собой дуплет Ti2p_{1/2} и Ti2p_{3/2}. Энергия связи электронов уровня Ti2p_{3/2} для металлического Ti составляет 453,8 эВ, для TiO_x (x < 1) – 454 эВ, для TiO₂ – 458,5 эВ. На спектрах хорошо видно изменение состава пленки от TiO₂ на поверхности образца через TiO_x до чистого Ti. Таким образом, результаты спектроскопии подтверждают наличие на поверхности титановой полоски пленки TiO₂. Толщина пленки первого образца (20 мин) составляет ~30 Å, второго (100 мин) – ~60 Å.

На рис.5 приведены результаты аналогичного исследования образцов предохранителей, подвергнутых быстрому отжигу при температуре 650°C (левый график) и 700°C (правый график). Время отжига – около 30 с. Послойные рентгеновские фотоэлектронные спектры показывают, что полоска состоит полностью из окислов титана.

Следовательно, при температуре 650–700°C сквозное проокисление полоски происходит за несколько секунд. При более высокой температуре этот процесс протекает еще быстрее. Как уже отмечалось, действие токового импульса амплитудой 15 мА в течение 20 мс приводит к увеличению температуры титановой полоски более чем до 800°C. Такого сочетания времени воздействия и температуры достаточно для сквозного проокисления и последующего разрушения полоски.

НАДЕЖНОСТЬ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

Предохранители должны надежно работать в течение как минимум 8 лет, включая время, необходимое для монтажа и ис-

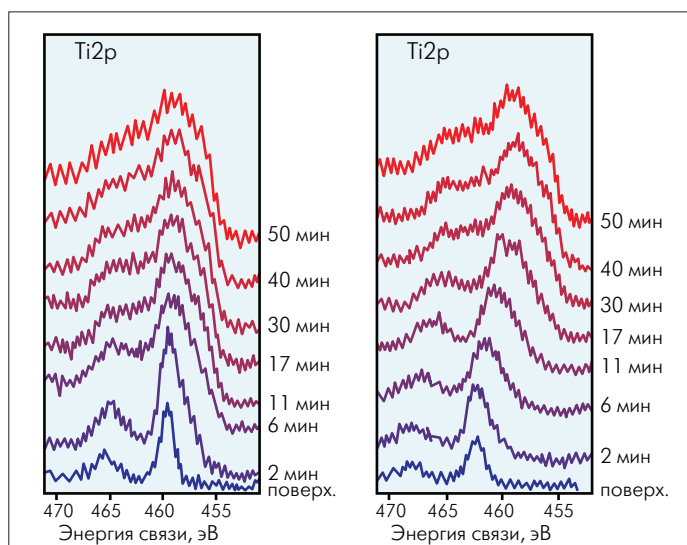


Рис.5. Послойные рентгеновские фотоэлектронные спектры тонкопленочной полоски предохранителя после быстрого высокотемпературного отжига

пытаний ТДПИ, и период проведения экспериментов. При этом омическое сопротивление предохранителя, его устойчивость к случайным пробоям и высокое сопротивление после пережигания должны быть стабильными. Чтобы добиться этого, предохранители проходят несколько специально разработанных процедур тестирования и отбора. Их подвергают воздействию высокого напряжения, нагреву, облучению пучками частиц высоких энергий. Условия тестирования более

жесткие, чем в штатных ситуациях работы ТДПИ. К эксплуатации допускаются только предохранители, успешно прошедшие все тесты.

Мелкосерийное производство разработанных высоковольтных предохранителей налажено на технологической базе кафедры микроэлектроники МИФИ. Для эксперимента ATLAS было поставлено более 40 тыс. таких приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lohse T. HERA-B proposal, DESY-PRC 94-01.
2. A Straw-Tube Tracker for ZEUS. ZEUS Note 98-046, 26.06.1998.
3. Bondarenko V. Kapton straw chambers for a tracking transition radiation detector. – Nucl. Instr. & Meth, 1993, A327, p. 386–394.
4. Akesson T. ATLAS inner detector technical design report. – CERN/LHCC, 1997, Vol. 2.
5. Dolgoshein B. Transition Radiation Detectors. – Nucl. Instr. & Meth., 1993, A326, p. 434.
6. Корнилов И.И., Глазова В.В. Взаимодействие тугоплавких металлов переходных групп с кислородом. – М.: Наука, 1967.
7. Meieran E.S., Flinn P.A., Carruthers J.R.. Analysis Technology for VLSI Fabrication. – Proceedings of the IEEE, 1987, Vol. 75(7), July.