

РАЗРУШЕНИЕ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНОГО ИОННОГО ПУЧКА НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ: ОБЪЕМНЫЙ МАТЕРИАЛ И ТОНКИЕ ПЛЕНКИ

В.С. Ковивчак

*Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники),
пр. Маркса 15, Омск, Россия, kvs_docent@mail.ru*

Проведено сравнительное исследование воздействия мощного ионного пучка наносекундной длительности на объемный (массивный) и тонкопленочный нитрид алюминия. Показано, что такое воздействие приводит к поверхностному растрескиванию нитрида алюминия и удалению части фрагментов разрушения. При плотности тока пучка 150 А/см^2 на поверхности объемного нитрида алюминия наблюдается формирование оплавленных частиц. На тонкопленочном нитриде алюминия наряду с отслоением и удалением фрагментов пленки от подложки наблюдается структурирование поверхностного слоя, связанного с кристаллизацией расплава. Оценен элементный состав поверхностных слоев нитрида алюминия. Обсуждены возможные механизмы наблюдаемых эффектов.

Ключевые слова: мощный ионный пучок; облучение; нитрид алюминия; разрушение; объемный материал; тонкие пленки.

FRACTURE OF ALUMINUM NITRIDE UNDER THE ACTION OF A HIGH-POWER ION BEAM OF NANOSECOND DURATION: BULK MATERIAL AND THIN FILMS

V.S. Kovivchak

*Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics),
15 Marx Ave., Omsk, Russia, kvs_docent@mail.ru*

A comparative study of the effect of a high power ion beam of nanosecond duration on bulk and thin-film aluminum nitride has been conducted. It has been shown that such an effect leads to surface cracking of aluminum nitride and removal of some of the fracture fragments. At a beam current density of 150 A/cm^2 , the formation of molten particles is observed on the surface of bulk aluminum nitride. On thin-film aluminum nitride, along with peeling and removal of film fragments from the substrate, structuring of the surface layer is observed, associated with crystallization of the melt. The elemental composition of the surface layers of aluminum nitride has been estimated. Possible mechanisms of the observed effects have been discussed.

Keywords: high-power ion beam; irradiation; aluminum nitride; fracture; bulk material; thin films.

Введение

Воздействие мощного ионного пучка (МИП) наносекундной длительности на диэлектрические материалы приводит к появлению поверхностных разрушений трещинами как перпендикулярными, так и параллельными поверхности материала [1, 2]. Характер разрушения для конкретного материала определяется механическими и тепловыми свойствами материала, плотностью поглощенной энергии ионного пучка, длительностью импульса облучения.

Особенностью нитрида алюминия является его высокая теплопроводность, ко-

торая превышает теплопроводность, например, оксида алюминия более, чем в 5 раз. Теплопроводность материала является важным параметром, который влияет на скорость нагрева и охлаждения поверхностного слоя материала, величину возникающих механических напряжений при воздействии МИП.

Хорошие пьезоэлектрические свойства, высокая теплопроводность нитрида алюминия обуславливают его широкое применение в различных микроэлектронных устройствах [3]. МИП может использоваться для модификации различных свойств нитрида алюминия, поэтому важ-

ным является вопрос выяснения предельных режимов облучения, при которых будет наступать механическое разрушение объемного и тонкопленочного (нанесенного на подложку) нитрида алюминия.

Материалы и методы исследования

Исследуемые объемные образцы керамики из нитрида алюминия имели размер $15 \times 10 \times 1 \text{ мм}^3$. Пленка нитрида алюминия толщиной до 1 мкм наносилась на подложку из ситалла СТ-50 или монокристаллического кремния методом реактивного магнетронного распыления. В ряде случаев пленки нитрида алюминия наносились на подложку, с предварительно нанесенной тонкой пленкой металла, чаще всего алюминия, толщиной $\sim 200 \text{ нм}$.

Облучение проводилось на ускорителе «Темп» (ОмГУ им. Ф.М. Достоевского) ионным пучком со следующими параметрами: состав - $30\% \text{ H}^+ + 70\% \text{ C}^{+n}$; энергия пучка $\sim 250 \text{ кэВ}$; плотность тока (j) до 150 А/см^2 ; длительность импульса – 60 нс. Морфология поверхности и элементный состав исследовались на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JSM-6610LV, JEOL с энергодисперсионным анализатором Inca-350. На поверхность нитрида алюминия, имеющего низкую проводимость, перед электронно-микроскопическим исследованием наносили тонкий слой ($\sim 10 \text{ нм}$) платины. Интерпретацию данных энергодисперсионного анализа проводили с учетом особенностей такого анализа для поликристаллических и тонкопленочных материалов [4]. Оценка пробега ионов используемого пучка в AlN дает значения 0.5 мкм для ионов углерода и 2.8 мкм для протонов.

Результаты и их обсуждение

Установлено, что однократное воздействие МИП с плотностью тока пучка 150 А/см^2 на объемный нитрид алюминия приводит к возникновению поверхностных трещин, характерных для термоударного разрушения (рис. 1). В объемном материале трещины в подавляющем боль-

шинстве случаев проходят по границам зерен керамики.

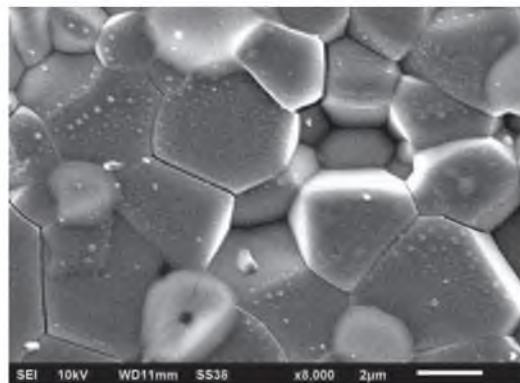


Рис. 1. СЭМ изображение поверхности AlN керамики, облученной с $j=150 \text{ А/см}^2$, 1 импульс

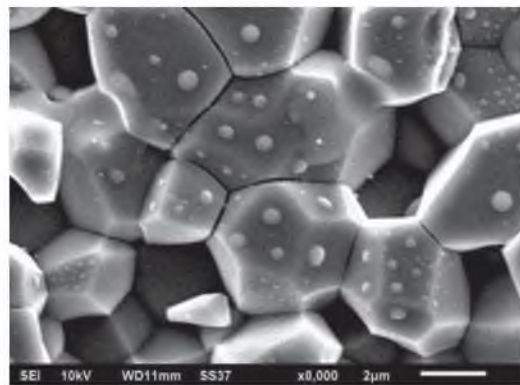


Рис. 2. СЭМ изображение поверхности AlN керамики, облученной с $j=150 \text{ А/см}^2$, 3 импульса

На поверхности видны капли застывшего расплава, с диаметром до 150 нм . Это свидетельствует о достижении на поверхности керамики температуры плавления нитрида алюминия (2200° C) уже при однократном облучении МИП.

Увеличение числа импульсов облучения до 3 при той же плотности тока пучка приводит к росту числа удаленных фрагментов разрушения и росту среднего размера капель до 450 нм (рис. 2). Увеличение диаметра капель, вероятно, связано как с увеличением глубины расплавленного слоя, так и с возможным обратным осаждением паров нитрида алюминия при воздействии МИП.

В тонкой пленке локализация трещин при облучении МИП определяется особенностями возникающего поля механических напряжений в системе «пленка-

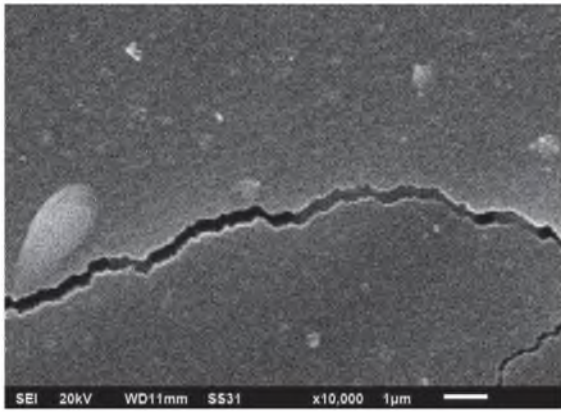


Рис. 3. СЭМ изображение поверхности AlN пленки, однократно облученной МИП с плотностью тока 50 А/см²

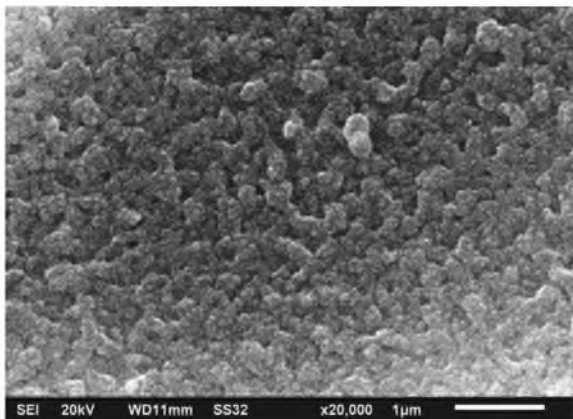


Рис. 4. СЭМ изображение поверхности AlN пленки, однократно облученной МИП с плотностью тока 150 А/см²

подложка», связанными, в том числе, с различными коэффициентами термического расширения этих материалов. Разрушение тонкой пленки при однократном облучении возникает при более низких плотностях тока облучения (рис. 3). На поверхности наблюдаются начальный этап структурирования поверхности и отдельные капли. При увеличении плотности тока до 150 А/см² часть фрагментов разрушений может удаляться с поверхности подложки. На оставшихся фрагментах разрушения наблюдается структурирование поверхности, с характерным размером структуры ~ 180 нм (рис. 4). Вероятно, она формируется на этапе кристаллизации расплавленного поверхностного слоя после окончания импульса облучения.

Как для объемного материала, так и для тонкой пленки после облучения МИП наблюдается обеднение поверхностного слоя азотом. Отношение Al:N для облученного/исходного образцов составляет: 1.31/1.09 для объемного материала и 1.42/1.06 для тонкой пленки. Обеднение поверхностных слоев азотом может сказываться на пьезоэлектрических характеристиках облученных материалов.

Заключение

Установлено, что облучение МИП нитрида алюминия (объемного и тонкой пленки) приводит к возникновению поверхностных трещин, частичному удалению фрагментов и обеднению поверхностного слоя азотом. Особенностью воздействия МИП на тонкую пленку нитрида алюминия является структурирование поверхностного слоя. При этом число капель расплава на поверхности тонкой пленки существенно меньше, чем на поверхности объемного материала.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 121121700062-3) с использованием оборудования Омского регионального центра коллективного пользования СО РАН.

Библиографические ссылки

1. Ковивчак В.С., Панова Т.В. Разрушение поверхностных слоев алюмооксидной керамики при воздействии мощного ионного пучка наносекундной длительности. *Поверхность* 2020; (1): 55-59.
2. Remnev G.E., Tarbokov V.A. & Pavlov S.K. Material modification by powerful pulsed ion beams. *Inorg. Mater.Appl.Res.* 2022; 13: 626-640.
3. Gao C., Wang Y., Cai Y., Lin B., Zou Y., Xu Q., et al. A scandium doped aluminum nitride thin film bulk acoustic resonator. *J. Micromech. Microeng.* 2024; 34: 085006.
4. Goldstein J.I., Newbury D.E., David C. Joy et al. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. New York: Springer US; 2013. 690 p.