

Секция: ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

УДК 53.091:53.096

АДГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР AlN/Si В УСЛОВИЯХ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО БЕТА-ОБЛУЧЕНИЯ

© А.А. Дмитриевский, М.В. Badilevich, Н.Ю. Ефремова, А.Р. Ловцов, В.В. Коренков, Е.Ю. Исаева, Д.Г. Гусева

Ключевые слова: адгезионные свойства; тонкие пленки; нитрид алюминия; кремний; низкоинтенсивное облучение.

Исследовано влияние облучения бета-частицами с плотностью потока $I \sim 1,2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ на процесс отслаивания аморфной пленки AlN (толщиной порядка 100 нм) от кремниевой подложки при царапании пирамидой Берковича с нарастающей нагрузкой. Обнаружено, что после облучения ($D = 2,16 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$) уменьшается тангенциальная сила, действующая на царапающий индентор, и пленка AlN начинает отслаиваться при меньшей нагрузке. Показано, что эффект зависит от ориентации индентора и проявляется при глубине царапины, превышающей толщину аморфной пленки нитрида алюминия.

ВВЕДЕНИЕ

Тонкие пленки традиционно используются в различных датчиках, системах магнитной и оптической записи и хранения информации, МЭМС/НЭМС, триботехнике, защите от коррозии и высоких температур и в других областях. Одним из наиболее перспективных материалов в опто- и микроэлектронике является нитрид алюминия [1–3], тонкие пленки которого выращивают на кремниевой подложке. Известно, что помимо аморфного состояния пленки AlN могут кристаллизоваться как в фазу вюрцита, так и в фазу цинковой обманки [4–6]. На механо-физические свойства материалов и их композиций могут оказывать влияние внешние воздействия радиационной природы, в т. ч. низкоинтенсивные. В [7] было обнаружено бета-индуцированное увеличение радиальных трещин, образующихся в AlN/Si при внедрении индентора. Это свидетельствует о возможности влияния низкоинтенсивного облучения на адгезионные свойства AlN/Si. В связи с этим целью работы являлось исследование влияния низкоинтенсивного бета-облучения на процесс отслоения аморфной пленки AlN от кремниевой подложки при царапании с нарастающей нагрузкой.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе исследовали образцы, представляющие собой композицию аморфной пленки AlN толщиной 90–100 нм на кремниевой подложке (100). Условия выращивания исследуемых структур были аналогичны [8]. Для облучения образцов использовали источник на основе препарата $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ со средней энергией эмиттируемых электронов 0,20 МэВ для ^{90}Sr и 0,93 МэВ для ^{90}Y . Параметры облучения соответствовали

условию бета-индуцированного увеличения склонности к трещинообразованию в структурах AlN/Si при индентировании [7]. Царапанье пирамидой Берковича с линейно нарастающей нагрузкой осуществляли с использованием микрозондовой системы NanoIndenter G200 (фирма MTS NanoInstruments), позволяющей регистрировать значения тангенциальной силы, действующей на индентор со стороны материала. Изображения царапин получали с использованием высокоразрешающего двухлучевого электронно-микроскопического комплекса Neon40 (фирмы Carl Zeiss).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Увеличение нагрузки на индентор при царапании структур AlN/Si приводит к появлению отслоений аморфной пленки нитрида алюминия от кремниевой подложки. Установлено, что характер отслоений и нагрузка на индентор P_c , при которой появляются первые отслоения, зависят от ориентации индентора по отношению к направлению его движения. На рис. 1 представлены SEM-изображения участков царапин с появившимися отслоениями. Видно, что при царапании ребром пирамиды Берковича пленка в первую очередь начинает отслаиваться внутри царапины (рис. 1а). Если образец царапать гранью индентора, то отслоения происходят преимущественно по краям царапины (рис. 1б). Важно отметить, что во втором случае процесс отслоения более интенсивен, и первые отслоения появляются в среднем при меньших значениях P_c .

Облучение образцов потоком бета-частиц не приводит к качественным изменениям вида

образующихся царапин вне зависимости от направления движения индентора.

Во время царапания с нарастающей нагрузкой регистрировалась тангенциальная сила F , действующая на индентор со стороны материала. Показано, что при

царапании ребром пирамиды Берковича изменения зависимости тангенциальной силы F от глубины внедрения индентора h , индуцируемые низкоинтенсивным облучением, незначительны (рис. 2а).

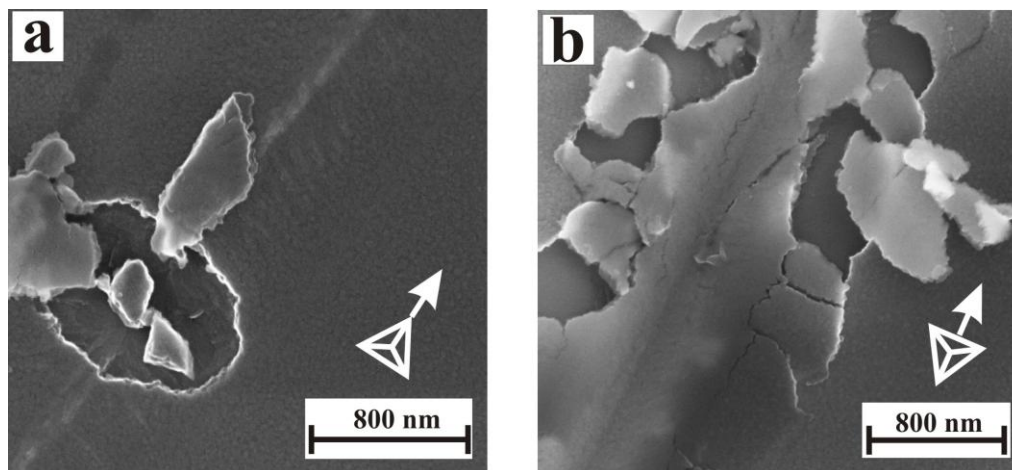


Рис. 1. SEM-изображения участков царапин на структурах AlN/Si, образованных при царапании ребром (а) и гранью (б) пирамиды Берковича. На врезках схематично изображены ориентации индентора по отношению к направлению его движения

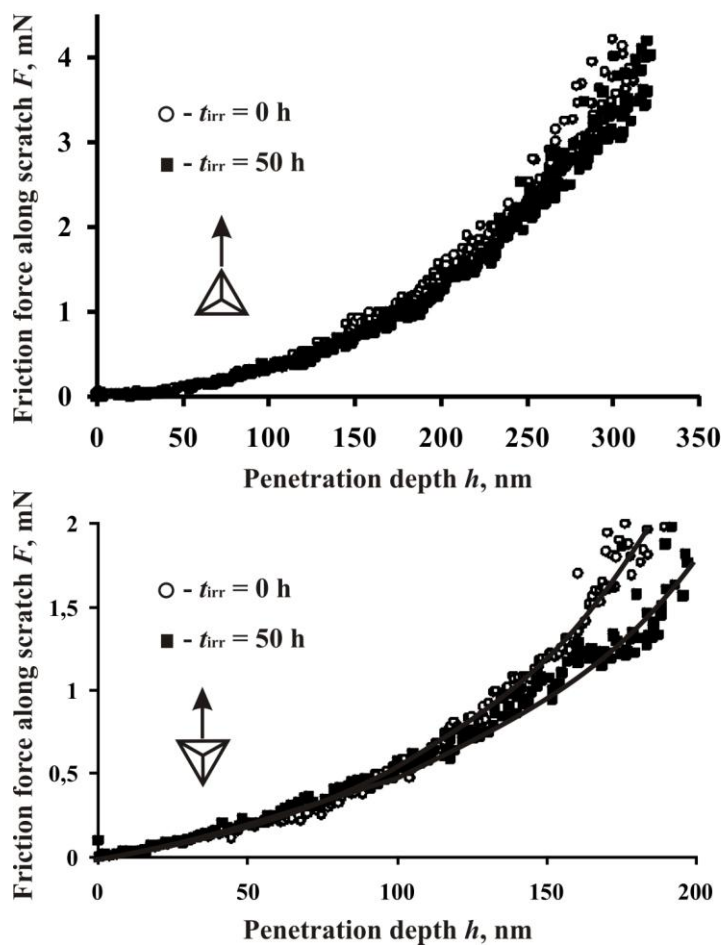


Рис. 2. Зависимости тангенциальной силы F , действующей на индентор со стороны материала, от глубины внедрения индентора при царапании ребром (а) и гранью (б). Круги – исходные (необлученные) структуры AlN/Si, квадраты – структуры

AlN/Si, предварительно облученные бета-частицами с флюенсом $D = 2,16 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. На врезках схематично изображены ориентации индентора по отношению к направлению его движения

В случае, когда индентор царапает гранью, облучение приводит к уменьшению тангенциальной силы F (рис. 2b). Эффект начинает проявляться при глубине внедрения $h > 100$ нм (превышающей толщину аморфной пленки AlN) и достигает 30–40 % при $h \sim 180$ нм.

Следует также отметить, что при данной ориентации индентора после облучения процесс отслоения аморфной пленки AlN от кремниевой подложки начинается при меньших нагрузках P_c и, соответственно, при меньших глубинах внедрения индентора h_c .

Переходя к обсуждению, отметим, что облучение бета-частицами с указанными выше параметрами модифицирует в основном тонкие (2–3 мкм) приповерхностные слои монокристаллов кремния [9]. Градиентное распределение радиационных дефектов в приповерхностных слоях при низкоинтенсивном облучении, по-видимому, связано с зарядовым состоянием поверхности и механическими напряжениями на границе раздела кремний – оксид кремния. Естественно, что роль механических напряжений на границе раздела кремний – нитрид алюминия гораздо значительнее. С этой точки зрения, модификация дефектной системы приповерхностных слоев кремниевой подложки, по-видимому, приводит к изменению адгезионных характеристик и, как следствие, к облегченному отслаиванию пленки AlN. Следует также отметить, что низкоинтенсивное бета-облучение не изменяет механических свойств (нанотвердость) самой пленки AlN [7], что является принципиально важным условием для практического использования обнаруженного явления, например, в технологии бондинга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом царапания с линейно нарастающей нагрузкой обнаружено уменьшение сил связи аморфной пленки нитрида алюминия с кремниевой подложкой, индуцируемое низкоинтенсивным ($I \sim 1,2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$) бета-облучением. Полученные данные о влиянии облучения на адгезионные характеристики кремния могут быть использованы в технологиях бондинга и получения нано-пленок и нано-фольг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nakamura S., Senoh M., Nagahama Sh., Iwasa N., Yamada T., Matsushita T., Kiyoku H., Sugimoto Y., Kozaki T., Umemoto H., Sano M., Chocho K. // Jpn. J. Appl. Phys. 1998. V. 37. Part 2. P. L309.
2. Miskys C.R., Garrido J.A., Nebel C.E., Hermann M., Ambacher O., Eickhoff M., Stutzmann M. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. P. 290.
3. Andrei A., Krupa K., Jozwik M., Delobelle P., Hirsinger L., Gorecki C., Nieradko L., Meunier C. // Sensors and Actuators A. 2008. V. 141. P. 565.
4. Jain S.C., Willander M., Narayan J., Van Overstraeten R. // J. Appl. Phys. 2000. V. 87. P. 965.
5. Cimalla V., Lebedev V., Kaiser U., Goldhahn R., Foerster Ch., Pezoldt J., and Ambacher O. // Phys. Status Solidi (c). 2005. № 2. P. 2199.
6. Lebedev V., Cimalla V., Kaiser U., Foerster Ch., Pezoldt J., Biskupek J., and Ambacher O. // J. Appl. Phys. 2005. № 97. P. 114306.
7. Dmitrievskiy A.A., Efremova N.Yu., Vihlyayeva E.M., Korenkov V.V., Shuklinov A.V., Badylevich M.V., Fedorenko Yu.G. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2010. V. 74. № 2. P. 209-212.
8. Badylevich M., Shamilia S., Afanas'ev V.V., Stesmans A., Fedorenko Yu.G., Zhao C. // J. Appl. Phys. 2008. V. 104. P. 093713.
9. Dmitrievskiy A.A., Efremova N.Yu., Lovtsov A.R., Umrikhin A.V. // XLI International conference on physics of interaction of the charged particles with crystals, 2011 Moscow, Russia. M., 2011.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., проект № П1892.

Поступила в редакцию 21 ноября 2012 г.

Dmitriyevskiy A.A., Badylevich M.V., Efremova N.Yu., Lovtsov A.R., Korenkov V.V., Isayeva E.Yu., Guseva D.G. ADHESION PROPERTIES OF AlN/Si STRUCTURES IN CONDITIONS OF LOW-FLUX BETA-IRRADIATION

Influence of low-flux ($I = 1.2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$) beta-irradiations on AlN amorphous thin film (thickness ~ 100 nm) exfoliation from a silicon substrate by Berkovich pyramid scratching with linearly increasing load was investigated. Decrease of friction force along scratch and decrease of load at which the AlN film is starting exfoliate after irradiation ($D = 2.16 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$) was revealed. It was shown that the effect depends on orientation of indenter and takes place only with the scratch depth exceeding a thickness of an amorphous film of aluminum nitride, and can be up to 30–40 % at scratch depth 150–180 nm.

Key words: adhesion properties; thin films; AlN; Si; low-flux irradiation.