

МЕТОД СКРЕЩЕННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ НАПЫЛЕНИЯ ПЛЕНОК КРЕМНИЯ

Е.В. Хайдуков, А.А. Лотин, В.В. Рочева, О.А. Новодворский, В.Я. Панченко
Учреждение Российской академии наук Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, г. Шатура, Россия
E-mail: khaydukov@mail.ru

The erosion plume from the silicon target has been investigated by the Langmuir probe method. The YAG: Nd³⁺ laser ($\lambda=1.06 \mu\text{m}$) was used for ablation. The time-of-flight ion curves of the plasma plume formed by crossed plumes from two targets (crossed-beam pulsed laser deposition method (CBPLD)) and the curves of the erosion plume from one Si target have been obtained. The research has been performed for the probe-target distances in the 40-157 mm range. The angular distribution of the plasma plume ions formed by crossed plumes has been obtained. For the free of drops area the Si film thickness distribution relative to the plasma plume axis has been received. The analysis by atomic-force microscopy (AFM) method showed high surface quality of the obtained Si films. At 300 °C substrate temperature the roughness does not exceed 1 nm.

В настоящее время интерес к исследованию кремния возобновился в связи с развитием нанотехнологий. Ведутся работы по созданию многослойных структур и материалов спинтроники на основе кремния [1,2]. В связи с этим возникает необходимость разработки метода получения высококачественных кремниевых пленок. Лазерно-плазменное напыление (ЛПН) позволяет получать эпитаксиальные тонкие пленки [3]. Недостатком данного метода является процесс образования капель при напылении пленки [4]. Одним из способов устранения капель является схема скрещенных пучков [5].

Известно, что на свойства получаемой пленки (тип кристаллической структуры, размер кристаллов, адгезия, эпитаксия и др.) существенное воздействие оказывает энергия частиц факела [6]. Поэтому важной характеристикой процесса лазерно-плазменного напыления является контроль и управление энергетическим спектром факела.

В настоящей работе методом зонда Ленгмюра исследованы распределения по скоростям ионов в факеле при абляции одной мишени кремния и в плазменном пучке, сформированном пересекающимися факелами при абляции двух мишеней кремния. Получены времяпролетные кривые (ВПК) ионного тока на зонд при расстояниях зонд-мишень в интервале 40-157 мм. Проведена аппроксимация ВПК суммой одномерных распределений Максвелла по скоростям для нескольких групп ионов. Измерено распределение толщины пленки в плоскости осей узконаправленных факелов. Получено распределение времени прихода пика ВПК от координаты относительно биссектральной оси. Получены образцы пленок кремния с шероховатостью поверхности 1 нм.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Эксперименты проводились в вакуумной камере, которая откачивалась турбомолекулярным насосом до давления 10^{-6} Торр. Мишени в виде дисков из монокристаллического кремния закреплялись в оправе и вращались для однородности выработки мишени. Лазерная эрозионная плазма от кремниевой мишени образовывалась под действием излучения твердотельного YAG:Nd^{3+} лазера с модуляцией добротности. Длительность импульса по полувысоте составляла 15 нс, энергия в импульсе 300 мДж. Луч делился на два равных, которые затем фокусировались на поверхность мишеней линзами с фокусным расстоянием 30 см. Площадь пятна фокусировки на мишени $0,65 \text{ мм}^2$.

Зонд Ленгмюра длиной 5 мм изготавливался из вольфрамовой проволоки диаметром 0,2 мм, которая помещалась в керамическую трубку. Зонд располагался перпендикулярно оси факела. Перемещение зонда в вакуумной камере осуществлялось вдоль оси эрозионного факела в интервале 40-157 мм. Потенциал зонда мог изменяться в пределах от 0 до -18 В. Источником регулируемого напряжения на зонде служила батарея аккумуляторов, которая одним полюсом через потенциометр подключалась к зонду, а другим полюсом через нагрузочный резистор заземлялась. Для стабилизации потенциала зонда во время протекания тока источник регулируемого напряжения шунтировался емкостью $2,5 \text{ мкФ}$. Ток зонда регистрировался на резисторе утечки 1 кОм с использованием быстродействующей платы аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) АТ-5102 фирмы International Instruments и записывался на ПК. Отсчет времени прихода зарядов на зонд производился от момента генерации лазерного импульса, регистрируемого фотодиодом, сигнал с которого подавался на канал запуска АЦП.

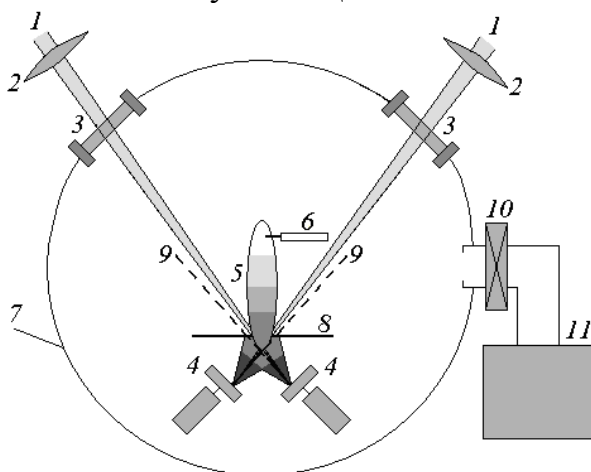


Рис. 1. Схема установки зондовых исследований плазменного пучка при абляции кремния: 1 - излучение твердотельного YAG:Nd^{3+} лазера, 2 - фокусирующая линза, 3 - окно вакуумной камеры, 4 - мишень, 5 - плазменный пучок, 6 - зонд Ленгмюра, 7 - вакуумная камера, 8 - диафрагма, 9 - ось факела, 10 - вакуумный затвор, 11 - турбомолекулярный насос.

В режиме перекрещенных пучков угол между мишенями и, соответственно, между факелами составлял 90° . Оси вращения мишеней располагались в одной плоскости. Перпендикулярно биссектрисе угла, образованного осями факелов, устанавливался неподвижный экран с

отверстием. Диаметр отверстия выбирался таким, чтобы исключить прямую видимость областей абляции мишеней с места расположения зонда, чем исключалось прямое попадание на зонд заряженных частиц от исходных факелов. При исследовании одного из исходных факелов регистрировался сигнал с зонда, расположенного на оси разлета этого факела, второй луч перекрывался, и экран не устанавливался.

Были получены ВПК ионного тока на зонд на разных расстояниях зонд-мишень как для плазменного пучка, образованного при пересечении двух факелов (рис. 2а), так и для факела от одной мишени кремния (рис. 2б).

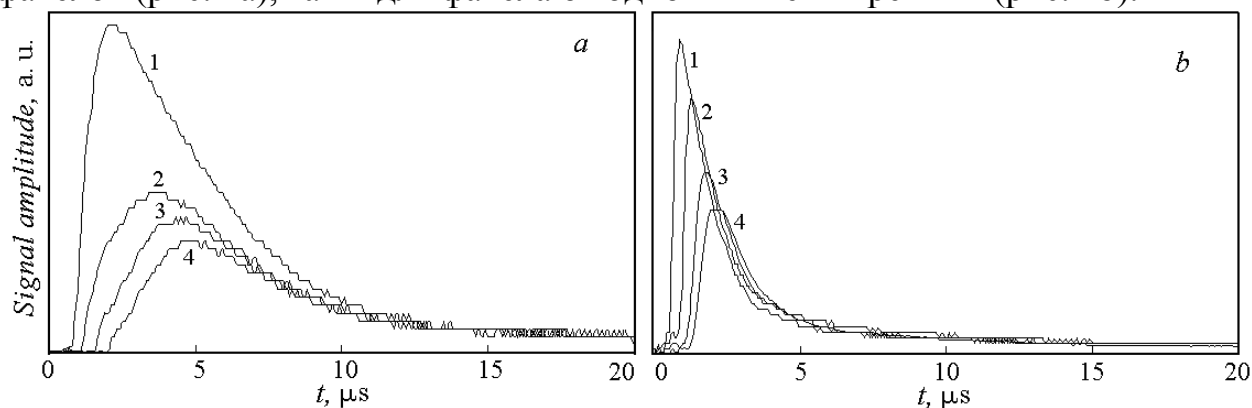


Рис. 2. Зондовые ВПК на разных расстояниях зонд-мишень: 1 - 72 мм, 2 - 102 мм, 3 - 132 мм, 4 - 157 мм; (а) - для плазменного пучка, образованного при пересечении двух факелов, (б) - для факела одной мишени. Потенциал зонда -18 В.

ВПК для обоих случаев имеют один ярко выраженный максимум с резким передним фронтом и более пологим задним фронтом, спадающим до нуля примерно за 30 мкс. Все ВПК были получены в интервале времени от 0 до 50 мкс, но для лучшего разрешения на рис. 2 интервал времени сокращен до 20 мкс. Амплитуда сигнала ВПК с увеличением расстояния зонд-мишень падает в результате расширения факела.

Из рис. 2 видно, что задержка переднего фронта сигнала пропорциональна расстоянию зонда до мишени. Были определены времена прихода лидирующей группы ионов от расстояния зонд-мишень в интервале 40-157 мм. Время прихода определялось по задержке между моментом абляции мишени и максимумом сигнала с зонда. Для обоих случаев образования эрозионного факела эта зависимость имеет линейный характер, то есть скорость разлета лидирующей группы ионов кремния не зависит от расстояния до мишени и составляет в плазменном пучке, образованном пересекающимися факелами 31 км/с, а в факеле от одной мишени кремния 70 км/с.

Асимметрия зондовых кривых, представленных на рис. 2, связана с неравновесным распределением ионов по скоростям в факеле [10]. Все полученные нами ВПК хорошо аппроксимируются суммой нескольких максвелловских кривых с разными положениями максимумов:

$$I(t) = K L t^{-4} \exp\left[-\frac{(L/t)^2}{v^2}\right], \text{ где } K - \text{коэффициент пропорциональности; } v -$$

наиболее вероятная скорость; L – расстояние зонд-мишень, t – время. Так ВПК для факела от одной мишени являются суммой четырех групп положительно заряженных частиц, распространяющихся со скоростями равными 71 км/с; 35,5 км/с; 18 км/с и 9 км/с. На рис. 4 представлены ВПК для расстояний зонд-мишень 72 и 157 мм и их аппроксимация суммой четырех максвелловских кривых. Видно, что суммарные кривые, обозначенные на рис. 4 кружками, практически совпадают с экспериментальными ВПК.

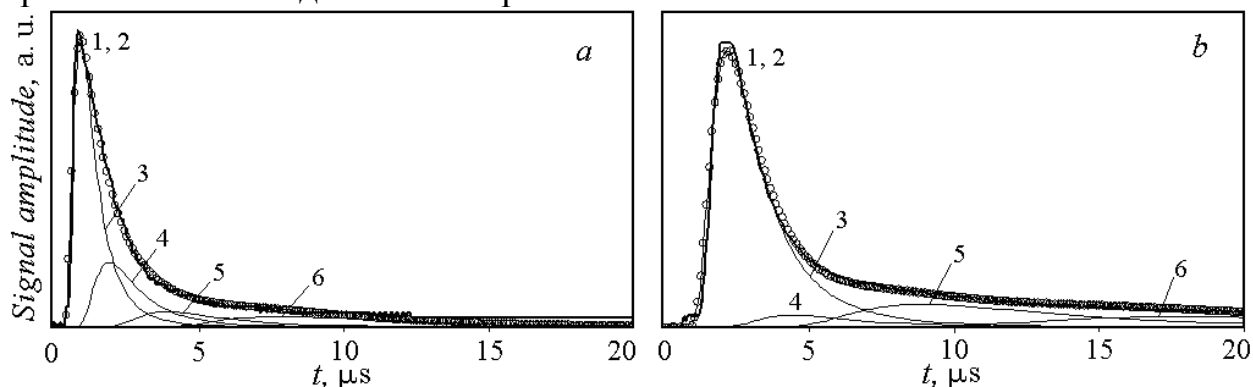


Рис. 4. Экспериментальные ВПК факела от одной мишени для расстояний зонд-мишень 72 мм (а) и 157 мм (б) и их аппроксимация суммой четырех максвелловских кривых. Толстой сплошной линией обозначена экспериментальная кривая 1, кружками отмечена расчетная кривая 2, представляющая собой сумму максвелловских кривых 3, 4, 5 и 6 для групп ионов со скоростями 71 км/с; 35,5 км/с; 18 км/с и 9 км/с соответственно.

Сравнивая ВПК ионов эрозионного факела от одной мишени (рис. 2б) и пучка, распространяющегося по биссектрисе угла между осями исходных факелов (рис. 2а), можно видеть, что энергетический спектр отклоненного пучка существенно отличается от энергетического спектра исходных факелов. Максимальная скорость в отклоненном пучке существенно ниже, чем скорость лидирующей группы ионов одиночного факела. Это вызвано тем, что эффективность отклонения ионов в пучках пропорциональна плотности ионов в пересекающихся пучках $n(t)$ и сечению столкновения ионов Q . Концентрацию ионов в факеле можно определить из известного соотношения для зонда Ленгмюра: $n(t) = \frac{I(t)}{0.5SeV} = \frac{I(t)t}{0.5SeL}$, где S – площадь зонда, e – заряд электрона, V – скорость ионов, $I(t)$ – ионный ток в режиме насыщения зонда, L – расстояние от зонда до мишени, t – время [11]. Тогда концентрацию n_1 ионов в отклоненном пучке можно найти из соотношения: $n_1(t) = 2n(t) \frac{Q}{S_i}$, где $n(t)$ – концентрация ионов в каждом факеле до пересечения, S_i – площадь сечения взаимодействия. Аналогичный вид имеет и выражение для тока на зонд в отклоненном пучке.

Был проведен расчет тока на зонд для плазменного пучка, образованного при пересечении двух факелов, для всех исследованных расстояний зонд-мишень. При расчетах были взяты только группы ионов со скоростями 71 км/с и 35,5 км/с, т.к. для более медленных групп ионов время взаимодействия велико [7] и вкладом от них можно пренебречь. Полученные для $Q \sim 1/V^2$, где

V – скорость ионов, расчетные кривые хорошо совпадают с экспериментальными ВПК для всех исследуемых расстояний. В общем случае, наибольшее отклонение будут испытывать ионы из тех участков факела, для которых произведение концентрации и сечения рассеяния будет максимальным.

Было измерено распределение толщины пленки в плоскости осей узконаправленных факелов, при плотности энергии на мишенях 30 Дж/см^2 . Схема напыления и результат измерения представлены на рис. 5.

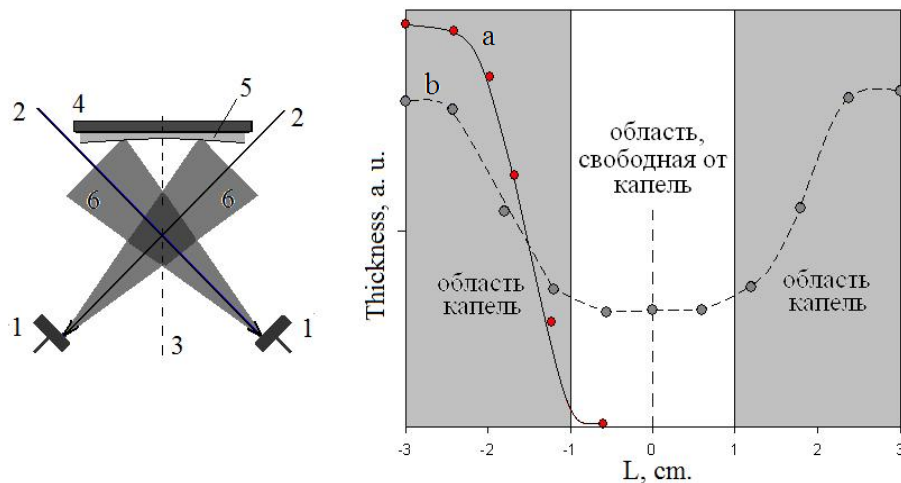


Рис.5. Схема исследования распределения по толщине пленки в плоскости осей факелов относительно биссектральной оси (обозначена пунктиром). На рис. обозначены: 1 – мишень, 2 – излучение лазера, 3 – биссектральная ось, 4 – подложка, 5 – пленка кремния, 6 – факел.

На рис.5 указаны области осаждения капель и зона свободная от капель. Кривая *a* показывает распределение толщины пленки, полученной при абляции только одной мишени, а кривая *b* описывает распределение толщины пленки при абляции двух мишеней (перекрещенные пучки).

Также было получено распределение времени прихода пика ВПК от координаты относительно биссектральной оси. Для этого зонд перемещался по дуге в плоскости разлета плазменных факелов, причем радиус дуги выбирался так, чтобы расстояние от точки пересечения факелов до зонда составляло 6 см. Плотность энергии на мишени составляла 20 Дж/см^2 . Полученное распределение представлено на рис.6.

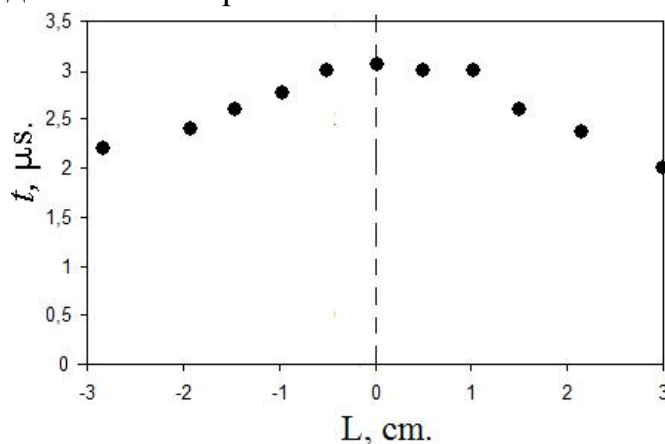


Рис.6. Распределение времени прихода пика ВПК от координаты относительно биссектральной оси (обозначена пунктиром) при плотности энергии на мишени 20 Дж/см^2 .

Из распределения видно, что скорость ионов, распространяющихся вдоль биссектральной оси, а соответственно и энергия, меньше скорости ионов двигающихся вдоль направлений разлета исходных эрозионных факелов.

Методом пересекающихся пучков получены образцы пленок кремния с шероховатостью поверхности менее 1 нм. На рис. 7 представлено изображение участка тонкой пленки кремния, полученное при помощи атомно-силового микроскопа (АСМ).

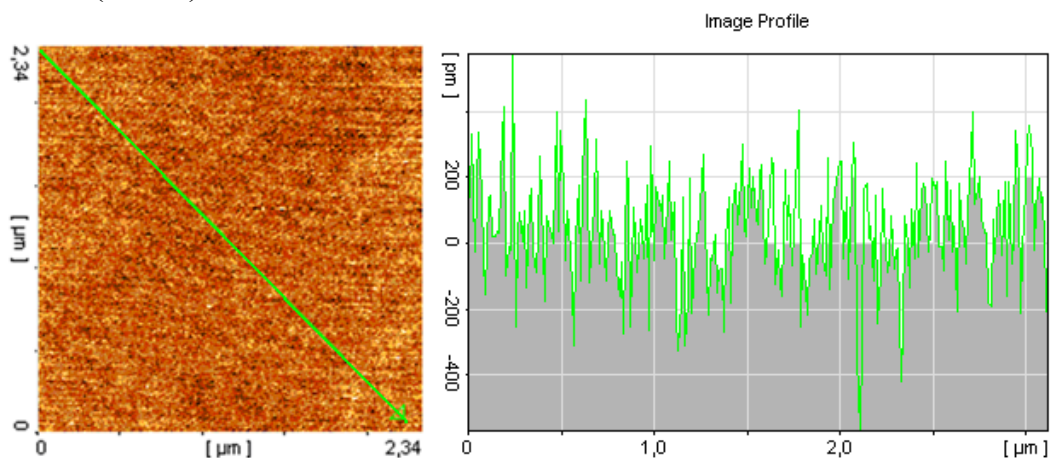


Рис. 7. АСМ изображение участка тонкой пленки кремния толщиной 150 нм без капель с шероховатостью поверхности 0,5 нм.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 09-08-00291, № 09-02-12108, № 09-08-01053.

1. Патрин Г.С., Овчинников С.Г., Великанов Д.А., Кононов В.П., ФТТ. 2001. 43. вып. 9, С. 1643-1645.
2. Bolduc M., Awo-Affouda. C., Stollenwerk A. et al. // Phys. Rev. B. 2005. V. 71. P. 033302-033305.
3. Панченко В.Я., Новодворский О.А., Голубев В.С. // Наука и технологии в промышленности. 2006. № 4. Часть 1. С. 39-51.
4. Хайдуков Е.В., Лотин А.А., Мельников Д.Н., Новодворский О.А, Панченко В.Я. // Труды IX Межвузовской школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». Москва. НИИЯФ МГУ. 2008. С. 127-131.
5. Gorbunov A., Tselev A., Pompe W. // Proceedings of SPIE. 1999. V. 3688. P. 351-358.
6. Saenger K.L. // J. Appl. Phys. 1991. V. 70. P. 5629-5635.
7. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2008, 3-е изд. 280 с.