

04;07;12

## Зондовые исследования лазерного эрозионного факела при абляции кремния в вакууме

© Е.В. Хайдуков, О.А. Новодворский, А.А. Лотин, В.В. Рочева, О.Д. Храмова, В.Я. Панченко

Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН,  
140700 Шатура, Московская область, Россия  
e-mail: khaydukov@mail.ru

(Поступило в Редакцию 28 мая 2009 г.)

Методом зонда Ленгмюра исследовался эрозионный факел, образующийся при абляции кремния излучением твердотельного лазера ( $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ ). Получены времяпролетные кривые ионных токов на зонд для плазменного пучка, образованного пересекающимися факелами от двух мишеней, и для эрозионного факела от одной мишени кремния. Исследования проведены для расстояний зонд–мишень в интервале 40–157 мм. Полученные времяпролетные кривые ионов эрозионного факела представляют собой сумму одномерных распределений Максвелла по скоростям для четырех групп ионов. Установлено, что в плазменном пучке, образованном пересекающимися факелами от двух мишеней, присутствуют не все группы ионов исходных факелов.

### Введение

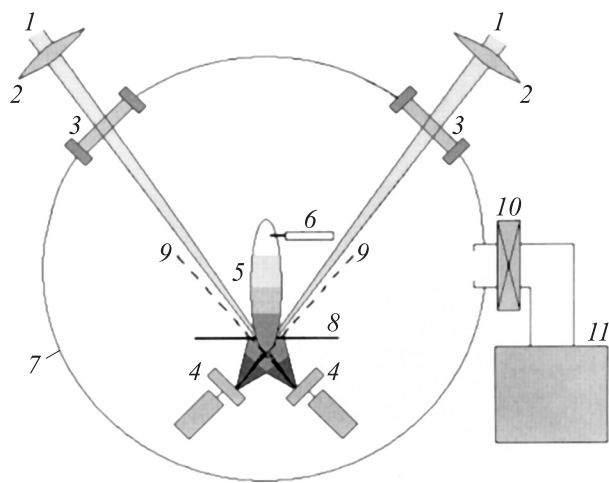
Кремний широко применяется в устройствах электроники и оптоэлектроники. Разработка дешевой технологии напыления ультратонких пленок кремния позволила бы внедрить в уже существующие „кремниевые“ технологии процесс создания многослойных структур, в состав которых входят кремниевые слои (материалы для спинтроники, солнечные элементы) [1,2]. Метод лазерно-плазменного напыления (ЛПН) является одним из эффективных способов формирования эпитаксиальных тонких пленок [2,3].

При создании тонких пленок кремния методом ЛПН необходимо избегать попадания капель на подложку [2,4–6]. Эффективным способом сепарации капель в методе ЛПН является схема перекрещивающихся пучков двух эрозионных факелов [7]. На свойства получаемой пленки (тип кристаллической структуры, размер кристаллов, адгезия, эпитаксия и др.) помимо капель существенное воздействие оказывает энергия частиц факела [8]. Поэтому важной характеристикой процесса лазерно-плазменного напыления является управление энергетическим спектром факела, в частности энергетическим спектром ионов [3,8–10], непосредственно в процессе роста тонкой пленки.

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.

### Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Эксперименты проводились в вакуумной камере, которая откачивалась турбомолекулярным насосом до давления  $10^{-4}$  Па. 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 ИАГ: Nd<sup>3+</sup>-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



**Рис. 1.** Схема установки зондовых исследований плазменного пучка при абляции кремния: 1 — излучение твердотельного ИАГ: Nd<sup>3+</sup>-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.

линзами с фокусным расстоянием 30 см. Площадь пятна фокусировки на мишени  $0.8 \text{ mm}^2$ .

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  $-18 \text{ V}$ . 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  $2.5 \mu\text{F}$ . Ток зонда регистрировался на резисторе утечки  $1 \text{ k}\Omega$  с использованием быстродействующей платы аналогоцифрового преобразователя (АЦП) AT-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.

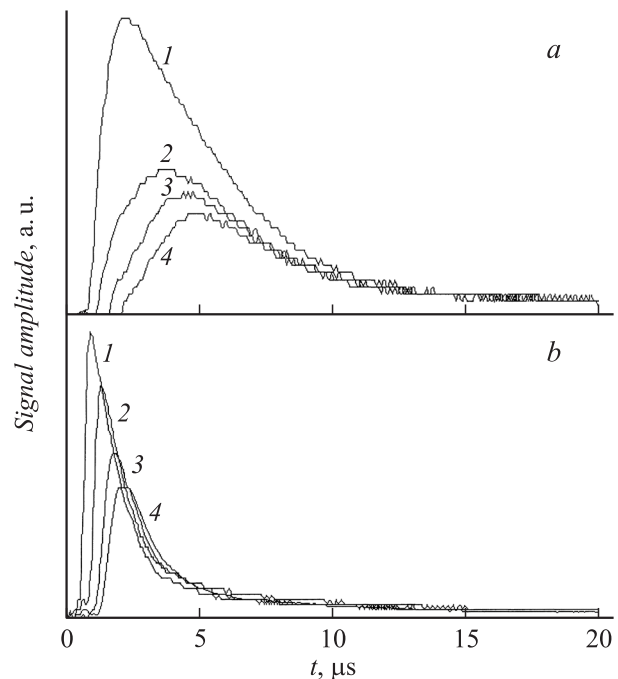
В режиме перекрещенных пучков угол между мишенями и соответственно между факелами составлял  $90^\circ$ . Оси вращения мишеней располагались в одной плоскости. Перпендикулярно биссектрисе угла, образованного осями факелов, устанавливался неподвижный экран с отверстиями. Диаметр отверстия выбирался таким образом, 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.

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

Получены ВПК ионного тока на зонд на разных расстояниях зонд–мишень как для плазменного пучка, образованного при пересечении двух факелов (рис. 2, *a*), так и для факела от одной мишени кремния (рис. 2, *b*).

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

Из рис. 2 видно, что задержка переднего фронта сигнала пропорциональна расстоянию от зонда до мишени. Были определены значения времени прихода лидирующей группы ионов от расстояния зонд–мишень

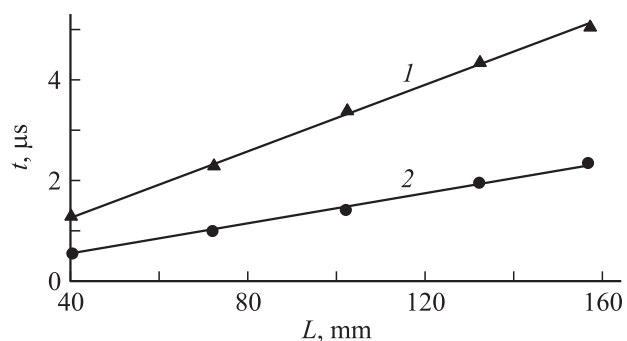


**Рис. 2.** Зондовые ВПК на разных расстояниях зонд–мишень: 1 — 72, 2 — 102, 3 — 132, 4 — 157 мм; *a* — для плазменного пучка, образованного при пересечении двух факелов, *b* — для факела одной мишени. Потенциал зонда  $-18 \text{ V}$ .

в интервале 40–157 мм. Время прихода определялось по задержке между моментом абляции мишени и максимумом сигнала с зонда. Полученные зависимости приведены на рис. 3. Для обоих случаев образования эрозионного факела эта зависимость имеет линейный характер.

Из рис. 3 видно, что скорость разлета лидирующей группы ионов кремния не зависит от расстояния до мишени и составляет в плазменном пучке, образованном пересекающимися факелами,  $31 \text{ km/s}$ , а в факеле от одной мишени кремния —  $70 \text{ km/s}$ .

Асимметрия зондовых кривых, представленных на рис. 2, связана с неравновесным распределением ионов



**Рис. 3.** Зависимость времени прихода пика ВПК от расстояния зонд–мишень: 1 — для плазменного пучка, образованного при пересечении двух факелов, 2 — для факела одной мишени.

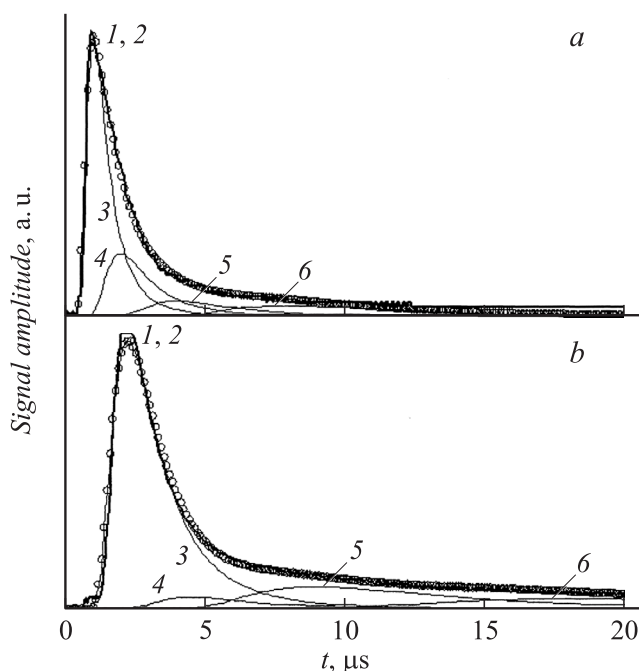
по скоростям в факеле [10]. Все полученные нами ВПК хорошо аппроксимируются суммой нескольких максвелловских кривых с разными положениями максимумов:

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

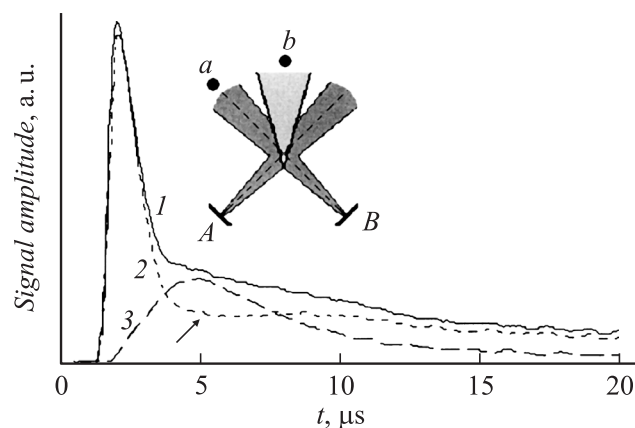
где  $K$  — коэффициент пропорциональности;  $v$  — наиболее вероятная скорость;  $L$  — расстояние зонд—мишень;  $t$  — время. Так, ВПК для факела от одной мишени являются суммой четырех групп положительно заряженных частиц, распространяющихся со скоростью 71, 35.5, 18 и 9 км/с.

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.

Сравнивая ВПК ионов эрозионного факела от одной мишени (рис. 2, *b*) и пучка, распространяющегося по биссектрисе угла между осями исходных факелов (рис. 2, *a*), можно видеть, что не все группы ионов, присутствующих в исходных факелах, отклоняются при взаимодействии. Максимальная скорость в отклоненном пучке существенно ниже, чем скорость лидирующей группы ионов одиночного факела. Для детального исследования причины различия в форме ВПК диафрагма 8



**Рис. 4.** Экспериментальные ВПК факела от одной мишени для расстояний зонд—мишень 72 (*a*) и 157 мм (*b*) и их аппроксимация суммой четырех максвелловских кривых. Жирной кривой обозначен эксперимент *I*, кружками отмечена расчетная кривая 2, представляющая собой сумму максвелловских кривых 3, 4, 5 и 6 для групп ионов со скоростью 71, 35.5, 18 и 9 км/с соответственно.



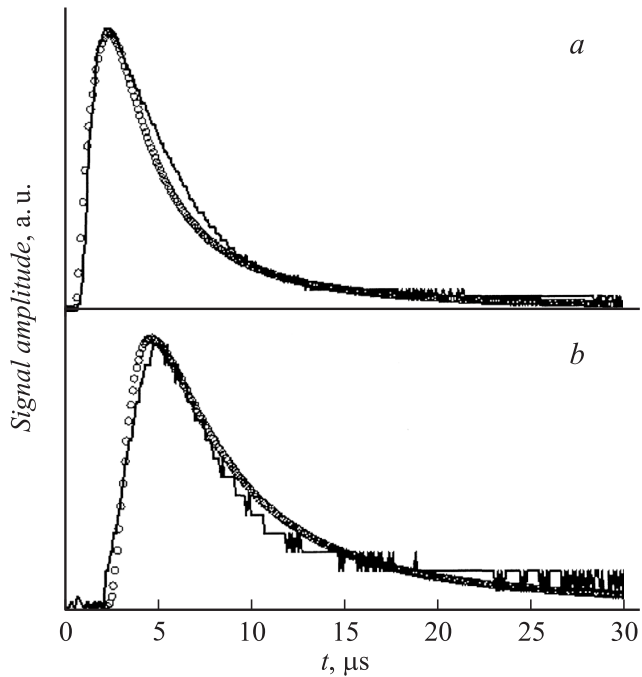
**Рис. 5.** Зондовые ВПК факела при расстоянии зонд—мишень 132 мм. 1 — зонд *a* на оси факела *B* при абляции только мишени *B*; 2 — зонд *a* на оси факела *B* при абляции обеих мишеней *A* и *B*, 3 — зонд *b* на биссектрисе угла между осями разлета факелов при абляции обеих мишеней *A* и *B*.

(рис. 1) убиралась, и на расстоянии 132 мм от мишени дополнительно устанавливался зонд на оси диаграммы разлета одного из факелов. Одновременно регистрировались сигналы с обоих зондов.

Были получены ВПК зонда *a*, представленные на рис. 5, как и для случая, когда происходила абляция обеих мишеней *A* и *B* (кривая 2), так и для случая, когда лазерный луч, осуществляющий абляцию мишени *A*, перекрывался (кривая 1). Видно, что сигнал на зонде *a* есть в обоих случаях. Отличие ВПК проявляется в некотором провале амплитуды в средней части кривой (на рис. 5 обозначен стрелкой) для случая абляции обеих мишеней. Это означает, что не все ионы, присутствующие в исходном факеле, отклоняются при взаимодействии факелов.

Из анализа полученных ВПК можно сделать вывод, что при взаимодействии пересекающихся пучков от исходного направления разлета по нормали к мишени отклоняются не все группы ионов, присутствующие в факеле. Из рис. 5 видно, что фронты ВПК 1 и 2 по времени совпадают, а фронт кривой 3 сдвинут во времени относительно кривых 1 и 2. На интервале времени от 2 до 15  $\mu$ s кривая 2 идет ниже кривой 1, т.е. имеет провал по амплитуде относительно кривой 1. Начальные и хвостовые части кривых 1 и 2 совпадают, т.е. лидирующая и хвостовая части факела не отклоняются. Провал на ВПК 2 (рис. 5) по времени и амплитуде соответствует отклоненной части факела (кривая 3). Испытывают отклонение и двигаются по биссектрисе угла между осями исходных факелов только их центральные участки.

Отклонение не всех ионов, присутствующих в плазменном факеле, можно объяснить из следующих соображений. Эффективность отклонения ионов в пучках пропорциональна плотности ионов в пересекающихся



**Рис. 6.** Экспериментальные ВПК отклоненного пучка (сплошные кривые) и их аппроксимация расчетными кривыми (кружки) для расстояний зонд–мишень 72 (а) и 157 mm (b).

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 [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 скоростью 71 и 35.5 km/s, так как для более медленных групп ионов время взаимодействия велико [12] и вкладом от них можно пренебречь. Полученные для  $Q \sim 1/V^2$  расчетные кривые хорошо совпадают с экспериментальными ВПК. Для  $L = 72$  и 157 mm экспериментальные и расчетные ВПК представлены на рис. 6.

В общем случае наибольшее отклонение будут испытывать ионы из тех участков факела, для которых произведение концентрации и сечения рассеяния будет максимальным.

## Заключение

Методом зонда Ленгмюра исследованы характеристики эрозионного факела при абляции кремния твердотельным ИАГ:Nd<sup>3+</sup>-лазером ( $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ ), работающим в режиме модуляции добротности.

При абляции одной мишени кремния, а также в плазменном пучке, образованном пересекающимися факелами при абляции двух мишеней, скорость разлета лидирующей группы ионов кремния не зависит от расстояния до мишени. Скорость разлета лидирующей группы ионов кремния в случае абляции одной мишени составляет 31 km/s, а в отклоненном пучке при пересечении факелов — 70 km/s при плотности мощности на мишени 1.25 GW/cm<sup>2</sup>.

Получены ВПК ионного тока на зонд при расстояниях зонд–мишень в интервале 40–157 mm. Проведена аппроксимация ВПК суммой одномерных распределений Максвелла по скоростям для нескольких групп ионов. Установлено, что не все группы ионов, присутствующих в факеле от одной мишени, испытывают отклонение при взаимодействии со вторым факелом: лидирующая и хвостовая части факела не отклоняются, а отклоняется только центральный участок, для которого произведение концентрации и сечения рассеяния максимально.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 09-02-01298; 09-08-00291) и МНТЦ (проект № 3294).

## Список литературы

- [1] Bolduc M., Awo-Affouda C., Stollenwerk A. et al. // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 71. P. 033 302–033 305.
- [2] Yasuda S., Chikyow T., Inoue S., Matsuki N., Miyazaki K., Nishio S., Kakihana M., Koinuma H. // J. Appl. Phys. A. 1999. Vol. 69. P. S925–S927.
- [3] Панченко В.Я., Новодворский О.А., Голубев В.С. // Наука и технологии в промышленности. 2006. № 4. Ч. 1. С. 39–51.
- [4] Хайдуков Е.В., Лотин А.А., Мельников Д.Н., Новодворский О.А., Панченко В.Я. // Тр. IX Межвуз. школы молодых специалистов „Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине“. М.: НИИЯФ МГУ, 2008. С. 127–131.
- [5] Masuda A., Matsuda K., Usui S., Minamikawa T., Shimizu T., Morimoto A., Yonezawa Y. // Mater. Sci. Eng. B. 1996. Vol. 41. P. 161–165.
- [6] Хайдуков Е.В., Лотин А.А., Новодворский О.А., Панченко В.Я., Рочева В.В. // Сб. докл. науч.-технич. секций Междунар. форума по нанотехнологиям. М., 2008. Т. 1. С. 771–772.
- [7] Gorbanov A., Tselev A., Pompe W. // Proc. SPIE. 1999. Vol. 3688. P. 351–358.

- [8] *Saenger K.L.* // J. Appl. Phys. 1991. Vol. 70. P. 5629–5635.
- [9] *Eason R.* Pulsed laser deposition of thin films: Applications-LED growth of functional materials. Hoboken. NY: Wiley-Interscience, 2007. 682 p.
- [10] *Новодворский О.А., Филиппова Е.О., Храмова О.Д., Шевелев А.К., Венцель К., Барта И.* // Квант. электрон. 2001. Т. 31. № 2. С. 159–163.
- [11] *Демидов В.И., Колобков Н.В., Кудрявцев А.А.* Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1996. 240 с.
- [12] *Франк-Каменецкий Д.А.* Лекции по физике плазмы. Долгопрудный: Изд-во „Интеллект“, 2008. 280 с.