

$$\sigma^{(2)} = 7,5 \cdot 10^{-32} \text{ см}^4.$$

Для силы осциллятора перехода $6p({}^1P_1) \rightarrow 7d({}^3D_2)$ здесь использовалось значение $f = 0.01$.

Таким образом, низший порядок теории возмущений не дает даже правильного порядка величины сечения. Нетрудно убедиться в том, что график рис. 2, б содержит дополнительный малый энергетический знаменатель, и его вклад в сечение будет превосходить вклад графика рис. 2, а на два порядка величины, если кулоновский матричный элемент, изображенный на графике волнистой линией, взять равным 0.01 (в атомной системе единиц). Возбуждение состояния $6p^2$ обязательно описывается графиком с кулоновским взаимодействием (рис. 2, в), содержащим малый энергетический знаменатель, поэтому сечение возбуждения обоих уровней имеет один порядок величины.

Авторы благодарны Б.А. Мамырину, М.Я. Амусье, М.Ю. Кучиеву за полезное обсуждение результатов.

Л и т е р а т у р а

- [1] Moore С.Е. Atomic energy levels. NBS, Washington, 1958.
- [2] Dexter J.L., Jaffe S.M., Gallagher T.F. - J. Phys., 1985, В18, p. 1735.
- [3] Делоне Н.Б., Крайнов В.П. Атом в сильном световом поле. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- [4] Lambropoulos P. - Adv. At. Mol. Phys., 1976, v. 12, p. 87.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию
6 октября 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 3

12 февраля 1988 г.

ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ИОНОВ ПРИ ДОВОЗБУЖДЕНИИ ФАКЕЛА СКОЛЬЗЯЩИМ РАЗРЯДОМ

П.Н. Д а ш у к, А.В. К о в т у н,
С.В. Л у к а ш е н к о, Б.Н. С о к о л о в

Искровые источники ионов широко используются в масс-спектрометрии, но они не обеспечивают высокой локальности анализа и требуют длительной подготовки непроводящих проб, мало пригодны для анализа больших поверхностей диэлектриков [1]. Лазерные источники ионов лишены этих недостатков [1], но у них невысока степень ионизации испаренного вещества. Традиционным комбинированным лазерно-искровым источникам ионов также присущи основные недо-

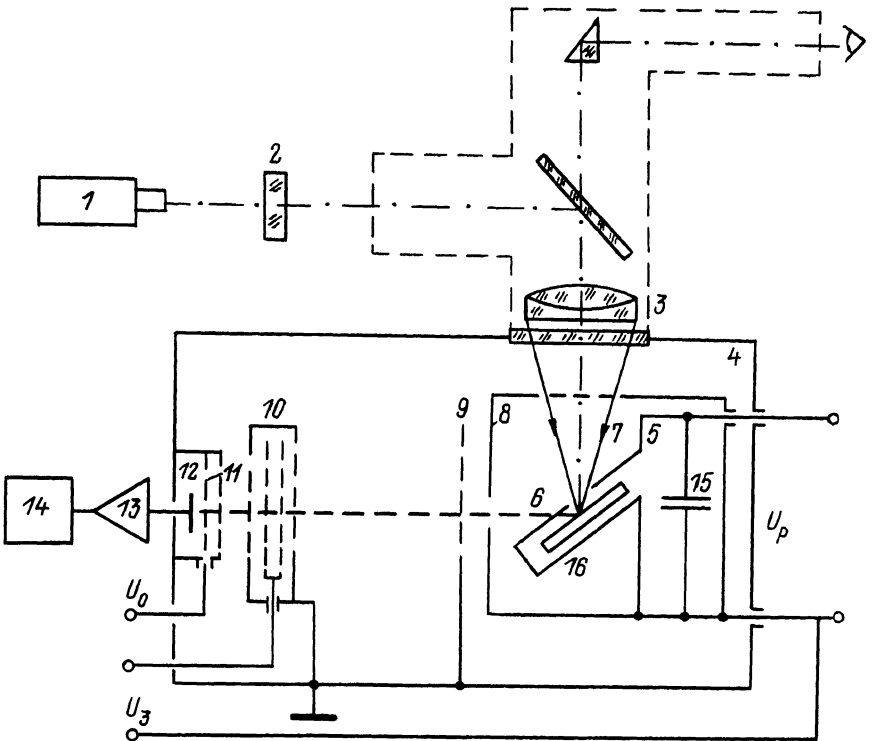


Схема экспериментальной установки. 1 - лазер; 2 - блок светофильтров, 3 - оптическая система; 4 - источник ионов с времяпролетным анализатором, 5 - образец, 6, 7 - электроды скользящего разряда, 8 - ускоряющий электрод, 9 - вытягивающий электрод, 10 - блок задержки ионов, 11 - антидинаatronная сетка, 12 - коллектор ионов, 13 - усилитель, 14 - осциллограф С8-13, 15 - конденсатор, 16 - обратный токопровод, U_3 - напряжение задержки, U_a - антидинаatronное напряжение.

статки искрового метода возбуждения, в частности, большой разброс ионов по начальным энергиям (0.7-0.9 кэВ на уровне 0.1). Поэтому представляется целесообразным исследовать характеристики метода получения ионов, который может более удачным образом соединять преимущества обоих методов ионизации - лазерно-плазменного метода получения ионов при довозбуждении факела скользящим разрядом (использование этого типа разряда обеспечивает высокую скорость и мощность процессов возбуждения и ионизации [2]).

Эскиз экспериментальной установки представлен на рисунке. Излучение лазера 1 (типа ЛТИПЧ-8, длина волны излучения 1.06 мкм,

энергия импульса 10 мДж, длительность импульса 20 нс), проходя через блок светофильтров 2, фокусируется оптической системой 3 (аналогичной описанной в [3], диаметр фокального пятна 20 мкм) на поверхности образца 5, расположенного в камере источника ионов 4, в зоне между электродами скользящего разряда 6 и 7. Расстояние между электродами 6 и 7 выбиралось равным 3–5 мм. Электрод 6, соединенный с ускоряющим электродом 8. Емкость конденсатора 15 составляла 330 пФ. Ионы ускорялись потенциалом, приложенным к сетке 9, и через четырехсеточную систему задержки 10 и пролетное пространство анализатора длиной 200 мм попадали на коллектор 12, защищенный экраном и антидинаatronной сеткой 11. Сигнал с коллектора усиливался и регистрировался запоминающим осциллографом. В режиме свободного разлета плазмы лазерного факела электроды 6 и 7 заземлялись, а в режиме свободного разлета плазмы разряда, инициируемого лазерным излучением, заземлялся электрод 6, а на электрод 7 подавалось напряжение разряда. В режиме измерения ионного тока с ускоряющим напряжением, на электрод 6 подавалось постоянное подпирющее напряжение 2 кВ, относительно которого на электрод 7 подавалось разрядное напряжение. На две центральные сетки схемы задержки для определения энергораспределения ионов и электронов подавалось напряжение до 3 кВ. В качестве образцов использовались: стекло ЖС-4, кремний, алюминий; толщина образцов составляла 0,1–1 мм. Система откачки обеспечивала давление $(2-3) \cdot 10^{-4}$ Па, что позволяло пренебречь процессами ионизации газа в камере источника ионов (контрольные повышения давления до 10^{-3} Па не приводили к изменению основных результатов экспериментов).

В работе определялись распределение ионов по энергии и степень ионизации в плазме материала образца при трех методах получения ионов: в плазме лазерного факела, в плазме скользящего разряда и в лазерно-плазменном методе при довозбуждении факела скользящим разрядом. Основные результаты представлены в таблице.

В случае чисто лазерной плазмы длительность импульса ионного тока на коллекторе составила по уровню 0,5 7–9 мкс. Число ионов, образованных за один импульс, определялось интегрированием сигнала с коллектора в предположении их косинусного распределения по углу разлета при эмиссии с мишени. Число частиц, испаренных за один импульс излучения лазера, определялось по размерам кратера. Ионы считались однозарядными, что подтверждалось формой кривых энергораспределения.

При ионизации в плазме скользящего разряда на электроды 6 и 7 подавалось импульсное напряжение 10 кВ, обеспечивающее устойчивое формирование разряда, емкость конденсатора 15–100 пФ. Длительность импульса ионного тока на коллекторе составила 4–6 мкс. Число частиц, испаренных за один импульс, определялось по размерам эрозионного следа. Энергораспределение ионов в плазме скользящего разряда практически не зависело от ускоряющего напряжения.

Энергетические характеристики плазмы лазерного факела, довозбуждаемого в разряде, плазмы скользящего разряда в лазерно-плазменном методе получения ионов, параметры эрозийных следов

Режим ускорения ионов	Плазма лазерного факела				Плазма скользящего разряда, $U_p = 10$ кВ															
	Плазма лазерного факела		Плазма лазерного факела		Плазма лазерного факела, довозбуждаемая в разряде $U_p = 2$ кВ			Плазма скользящего разряда, $U_p = 10$ кВ												
	ΔE , эВ	\bar{E} , эВ	E_{max} , эВ	α , %	ΔE , эВ	\bar{E} , эВ	E_{max} , эВ	α , %	ΔE , эВ	\bar{E} , эВ	E_{max} , эВ	α , %								
	10.5 0.11				0.5 0.1				0.5 0.1											
Свободный разлет	20	110	380	2.3	40	160	40	310	3	35	175	30	230	12	50	210	80	300	15.7	
Ускоряющее напряжение 2 кВ	20	40	80	4.2	65	190	20	280	6.3											
	45	90	50	5.2																
	130	1100	60	400	2.8	70	340	20	950	3.6	30	110	20	290	10.2	45	190	75	280	16
	280	1600	100	600	5.0															
Относительное среднее квадратическое отклонение числа ионов за импульс (%)																				
				5																
Размер эрозийного следа																				
	ЖС-А																			
	Si																			
	Al																			
	ЖС-А																			
	Si																			
	Al																			

Какавка, длина 2.5 мм
ширина 0.45 мм, глубина 1.10-6 мм

Кратер, диаметр $2 \cdot 10^{-2}$ мм, глубина $1 \cdot 10^{-3}$ мм

Кратер, диаметр $1.8 \cdot 10^{-2}$ мм, глубина $1 \cdot 10^{-3}$ мм

Кратер, диаметр $0.75 \cdot 10^{-2}$ мм, глубина $5 \cdot 10^{-3}$ мм

U_p - напряжение на разрядном промежутке, E - ширина энергетического распределения (0.5 - по уровню 0.5, 0.1 - по уровню 0.1), E_{max} - средняя энергия ионов, E_{max} - максимальная энергия ионов, α - степень ионизации.

Для анализа характеристик ионов, получаемых при довозбуждении плазмы лазерного факела в скользящем разряде, на электроды подавалось постоянное напряжение: минимальное, обеспечивающее устойчивое формирование разряда — 800 В, и максимальное — 2 кВ, обеспечивающее отсутствие самопробоя. Максимальное напряжение для чистого кремния — 1 кВ, вследствие пробоя на металлическую подложку. Электрический пробой инициировался лазерным излучением. Длительность ионного тока на коллекторе составила 10–12 мкс. Величина ионного тока для данного режима существенно зависела от места фокусировки лазерного излучения, сигнал при фокусировке у катода оказался в 4 раза больше, чем у анода, и в 1,6 раза больше, чем в середине межэлектродного зазора. Кроме того, сигнал максимален при фокусировке на линии, соединяющей электроды; при смещении места фокусировки от этой линии на 0,5 мм сигнал падает в 1,5 раза, а при смещении на 2 мм — в 4 раза.

Следует отметить, что применение скользящего разряда для довозбуждения лазерного факела увеличивает выходной сигнал (число ионов, образованных за один импульс) по сравнению с чисто лазерной плазмой (при напряжении на разрядном промежутке 2 кВ) не менее, чем в 5–10 раз. С другой стороны, в этом случае по сравнению с чисто разрядной плазмой уменьшается степень ионизации. В режиме с ускоряющим напряжением снижается разброс ионов по энергии как по сравнению с плазмой лазерного факела, так и с плазмой разряда. Кроме того, в этом случае сохраняется высокая локальность анализа, характерная для чисто лазерного метода ионизации, т.к. глубина эрозионного следа на поверхности образца от разрядной плазмы на несколько порядков меньше глубины кратера.

В случае чисто лазерной плазмы энергораспределение ионов для алюминиевого образца хорошо согласуется с [4] и моделью газодинамического расширения плазменного облака, а максимальная энергия ионов при свободном разлете 600–650 эВ хорошо согласуется с моделью электростатического ускорения ионов на границе плазменного сгустка в двойном электрическом слое. Для выяснения искажений в энергораспределении, вносимых возможным зарядом поверхности диэлектрика при удалении от нее ионов, было определено энергораспределение ионов в лазерной плазме при использовании полупроводниковых (кремний) и проводящих (алюминий) образцов; эти результаты показали, что указанным фактором уширения энергораспределения можно пренебречь.

Таким образом, довозбуждение плазмы лазерного факела в скользящем разряде позволяет улучшить некоторые основные характеристики лазерного метода ионизации: значительно повысить величину ионного тока и снизить разброс ионов по энергии (в режиме с ускоряющим напряжением). С другой стороны, указанный метод позволяет улучшить и некоторые основные характеристики метода ионизации в скользящем разряде, в частности, увеличить локальность анализа, повысить стабильность ионного тока. Проведенные измерения показали целесообразность проведения анализа не только энергетического спектра, но и массового состава ионов, образованных при довозбуждении плазмы лазерного факела в скользящем разряде.

- [1] Сысоев А.А., Чупахин М.С. Введение в масс-спектрометрию, М.: Атомиздат, 1977.
- [2] Дашук П.Н. - Тез. докл. П Всесоюз. совещ. по физике электрического пробоя газов, ч. 1, Тарту, 5-8 июня 1984 г.
- [3] Дашук П.Н., Ковтун А.В., Лукашенко С.В., Соколов Б.Н. - Письма в ЖТФ, 1986, т. 12, в. 23, с. 1415-1419.
- [4] Быковский Ю.А., Неволлин В.Н. Лазерная масс-спектрометрия, М.: Энергия, 1985.

Ленинградский политехнический
институт им. М.И. Калинина

Поступило в Редакцию
18 октября 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 3

12 февраля 1988 г.

УПРАВЛЯЕМАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ТРЕКОВ ЭЛЕКТРОНОВ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ФОНА

В.М. У л а н о в, И.О. Щ е р б а к о в

В работе [1] было обнаружено, что в фотографических эмульсиях для ядерных исследований с высокой концентрацией бромистого серебра приложение электрического поля напряженностью ~ 1 МВ/см вызывает множественные микропробой слоя. Невозможность локализовать электронную лавину, возникающую под действием поля, в отдельных микрокристаллах $AgBr$ при среднем расстоянии между их поверхностями ~ 100 А, заставило уменьшить концентрацию и перейти к обычным фотографическим эмульсиям [2]. Основным недостатком использования таких эмульсий является малый диапазон управления чувствительностью, связанный с тем, что минимальные ионизационные потери заряженной частицы в $AgBr$ составляют ~ 1 кэВ/мкм. Вследствие выделения столь значительной энергии, микрокристаллы размером ~ 1 мкм приобретают способность к проявлению независимо от последующего действия электрического поля. Способы предэкспозиционной обработки слоев, понижающие их исходную чувствительность, не могут обеспечить воспроизводимые результаты, поскольку зависят от постоянства многих параметров - температуры и концентрации растворов, времени обработки, равномерности диффузии и т.д.

Нами было предложено использовать для целей управляемой регистрации заряженных частиц эмульсии с микрокристаллами типа ядро-оболочка, которые представляют собой ядра из микрокристаллов высокочувствительной эмульсии, зарощенные тонкой 50-100 А оболочкой из чистого $AgBr$. Обычно для проявления таких эмульсий используют составы с дополнительными добавками, которые подраст-