

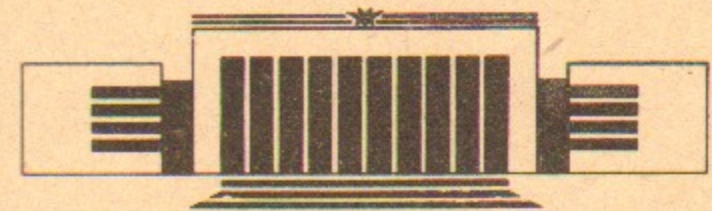


61
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН

Б.А. Князев, П.И. Мельников

”КАТАЛИТИЧЕСКАЯ” ИОНИЗАЦИЯ
МНОГОКОМПОНЕНТНОГО
ГАЗОВОГО ОБЛАКА В ПОЛЕ РЕЗОНАНСНОГО
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ИЯФ 92-74



НОВОСИБИРСК

**"Каталитическая" ионизация
многокомпонентного газового облака
в поле резонансного лазерного излучения**

Б.А.Князев, П.И.Мельников

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
630090, Новосибирск 90, Россия

АННОТАЦИЯ

Предложено использовать механизм, основанный на сверхупругих столкновениях "затравочных" электронов с атомами, возбужденными резонансным излучением в режиме насыщения, для ионизации многокомпонентного газового облака в вакууме. Эти рабочие атомы играют роль "катализатора" для ионизации остальных "нерезонансных" атомов. Показано, что в качестве рабочего вещества может быть выбран тантал, характеризующийся уникальным совпадением энергий переходов из основного состояния как атома, так и иона, с энергией фотона КгГ лазера, что может значительно повысить эффективность ионизации. Рассмотрена возможность использования предложенного механизма для создания ионных источников, в том числе и для полупроводниковой промышленности.

© Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Россия

1. Исследования элементарных процессов в газах и плазме продолжают в течение многих лет (см., например, [1]) и имеют общую тенденцию смещения основных усилий от измерений средних по ансамблю констант скоростей тех или иных процессов к более детальному анализу отдельных каналов процесса, например, протекающих через конкретные электронные (колебательные) состояния и т.п. Появление лазеров привело к дальнейшему развитию этой тенденции, поскольку дало возможность, с одной стороны, возбуждать необходимые состояния, с другой, — надежно измерять их заселенность методом "резонансной флуоресценции" [2].

Значительное место в атомной физике последние годы уделяется ионизационным процессам, осуществляемым с помощью лазерного излучения: нелинейной многофотонной ионизации, ступенчатой многофотонной ионизации, ионизации через возбуждение ридберговских состояний [3]. Особый интерес представляет ионизация, наблюдающаяся в относительно плотном газе при возбуждении его лазерным излучением, резонансным переходу из основного состояния в одно из возбужденных [4]. Энергия фотона в экспериментах была меньше, чем потенциал ионизации из возбужденного состояния, а интенсивность излучения ($\sim \text{МВт/см}^2$) недостаточна для многофотонной ионизации, поэтому непосредственная фотоионизация была невозможна.

Объяснение этого явления было предложено Мэджерсом и Кардиналом [5]. Согласно их модели, на первой стадии процесса в поле лазерного излучения, имеющего большой параметр насыщения [2], заселенность резонансного уровня достигает своего максимального значения, определяемого отношением статвесов верхнего и нижнего состояний. На второй стадии процесса за счет различных процессов с участием возбужденных атомов и фотонов (фотоионизация, пеннинговская ионизация, ассоциативная ионизация) образуется постепенно возрастающая популяция "затравочных" электронов. Эти электроны в сверхупругих столкновениях с воз-

бужденными атомами (очевидно, что вероятность таких столкновений выше, чем вероятность охлаждения электронов в столкновениях с невозбужденными атомами) набирают энергию, после чего начинается третья стадия, когда происходит ионизация резонансного уровня электронным ударом и верхних столкновительно возбужденных уровней фотонами. Температура электронов стабилизируется на некотором уровне, определяемом балансом нагрева и потерь на ионизацию и возбуждение. На последней стадии происходит "вспышка" ионизации электронами верхних уровней и полная ионизация атомов, возбуждаемых лазером. Среда становится прозрачной к лазерному излучению, а электронная температура начинает падать.

Описанному выше процессу авторы работы [5] дали название Лазерная Ионизация Основанная на Резонансном Насыщении (ЛИОРН). Этот способ ионизации может представлять значительный интерес как в научных, так и практических целях. В качестве примера отметим, что сугубо лабораторный эксперимент [4] нашел практическое приложение на одной из крупнейших экспериментальных установок в мире, — мощном ионном ускорителе РВФА II [6], в котором описанным способом была решена проблема создания тонкого слоя литиевых ионов вблизи поверхности большой площади.

2. К настоящему времени выполнено ограниченное число экспериментальных работ по ЛИОРН, целями которых были либо демонстрация явления, либо его практическое приложение. Детали элементарных процессов, динамика функций распределения электронов и ионов по энергиям и другие характеристики детально не исследовались. Все предыдущие эксперименты проводились с использованием для накачки лазеров на красителях. Это имеет некоторые недостатки. Во-первых, обладая большим преимуществом — возможностью перестройки длины волны, лазеры на красителях, фотохимически неустойчивы [7] и требуют постоянной смены активной среды (работа лазеров с большой энергией импульса в частотном режиме практически невозможна). Во-вторых, при переходе к новой атомной системе для изменения длины волны требуется, как правило, замена лазерной среды.

Первый недостаток может быть ликвидирован, если подобрать элемент, у которого резонансная линия случайным образом совпадает с полосой излучения надежного технологичного лазера. К сожалению, это осуществляется в очень редких случаях (например, для атома Ti и азотного лазера [8]), однако, если бы подобный элемент удалось найти для лазера с приличными параметрами (например, эксимерного), то для ионизации других атомов можно было бы использовать этот элемент в

качестве малой примеси. Указанный механизм ионизации можно назвать Каталитической Лазерной Ионизацией Основанной на Резонансном Насыщении (КЛИОРН), поскольку роль этого элемента аналогична роли катализатора в химических реакциях.

Предлагаемый механизм ионизации может вообще стать универсальным, если одновременно вторым лазером возбуждать резонансную линию иона элемента-катализатора. Тогда, благодаря более высокому потенциалу ионизации иона по сравнению с атомами, можно ожидать, что, в смеси будут эффективно ионизоваться даже элементы с очень высокими потенциалами ионизации, причем, в отличие от схемы описанной Мэжерсом, при необходимости, можно будет управлять подогревом электронов даже после полной ионизации среды. Эту схему ионизации мы будем называть схемой с двойным резонансом. Особый интерес эта схема может представлять, если найти элемент, у которого есть резонансные переходы с идентичными длинами волн как у атома, так и у иона.

3. Первые эксперименты по ЛИОРН проводились с натрием, имеющим высокую упругость паров при умеренных температурах. Расширение класса исследуемых веществ заставляет искать иные методы создания газовых смесей. Наиболее универсальным способом, адекватным рассматриваемой задаче, является получение газового облака путем лазерного испарения из конденсированной фазы. Процессы испарения графита, свинца, титана, алюминия (а позже [10], — лития) были экспериментально исследованы, например, в работах [8, 9], где было показано, что при правильном выборе параметров испаряющего лазера можно получать достаточно плотные газовые облака с резкой границей газ-вакуум при небольшой плотности мощности ($3-10 \text{ МВт/см}^2$) и умеренной энергии ($0.3-3 \text{ Дж}$) лазерного импульса.

В качестве источников лазерного излучения в экспериментах могут быть использованы разработанные авторами лазеры на красителях, пригодные и для испарения, и для селективного возбуждения выбранных атомных уровней [10-12], а также двухкамерный эксимерный лазер с энергией в импульсе $0.1-1 \text{ Дж}$.

В качестве элементов — "катализаторов" можно, в принципе, выбрать следующие элементы, резонансный переход в которых совпадает с линиями генерации эксимерных лазеров: As(193 нм), Ti(223 нм, 351 нм), Al(308 нм), Ta(248 нм). В этом случае интересно провести эксперименты в смеси катализатора с элементами, имеющими существенно различающиеся структуры уровней, потенциалы ионизации.

Особый интерес представляют эксперименты с атомами тантала в качестве катализаторов. По нашим данным на сегодняшний день, TaII—

единственный ион, который имеет резонансный переход, возбуждаемый излучением эксимерного лазера на KrF ($\lambda=248$ нм), причем та же длина волны 248 нм возбуждает и резонансный переход TaI . Указанное обстоятельство весьма существенно, поскольку возбужденные атомы TaI могут фотоионизоваться излучением KrF лазера, тогда как потенциал ионизации возбужденного иона TaII^* равен 11,2 эВ и, следовательно, его прямая фотоионизация исключена. Таким образом, использование тантала в качестве добавки к основному составу облака позволяет поддерживать резонансную накачку среды даже после осуществления первой ступени ионизации.

4. Предлагаемый метод ионизации в случае, если он будет практически реализован, может оказаться полезным при создании ионных источников, особенно для полупроводниковой промышленности. Известно, что лазерные ионные источники, разрабатываемые для этой цели, до сих пор не обладают необходимыми характеристиками. Возможно, это отчасти связано со слишком высокой температурой "лазерной" плазмы и малой эффективностью использования лазерного излучения. При рассматриваемом нами механизме температура ионов может оказаться невысокой, а эффективность лазерного испарения, как показано в [9], в нашем случае достаточно высока. Дополнительным преимуществом можно считать использование для "производства" плазмы твердой фазы,—это позволило бы заменить источники с экологически вредными газообразными соединениями фосфора, мышьяка и других подобных элементов на значительно менее опасные твердотельные.

Для решения вопроса об эффективности использования рассматриваемого механизма в этих целях необходимы дополнительные экспериментальные и теоретические исследования, в частности, детальное исследование механизма процесса каталитической ионизации, определение функций распределения электронов, атомов и ионов по энергиям и электронным состояниям, а также определение наиболее подходящих для этого процесса групп элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мак-Даниэль И. Процессы столкновений в ионизованных газах.— М.: Мир, 1967, 832 с.
2. Зайдель А.Н. Атомно-флуоресцентный анализ.— М.: Наука, 1980, 217 с.
3. Летохов В.С. Лазерная фотоионизационная спектроскопия.— М.: Наука, 1987, 318 с.

4. Lucatoro T.B., McIlrath T.J. Efficient laser production of a Na^+ ground-state plasma column: absorption spectroscopy and photoionization measurement of Na^+ . Phys. Rev. Letters, 1976, v.37, N.7, p.428–431.
5. Measures R.M., Cardinal P.G. Laser ionization based on resonance saturation—a simple model description. Phys. Rev. A, 1981, v.23, N.2, p.804–815.
6. Bieg K.W., Tisone G.C. et al. A laser-produced lithium ion source for pulsed-power inertial confinement fusion. Proc. of the Eighth International Conference on High-Power Particle Beams. Novosibirsk, 1990, v.2, p.933–939.
7. Князев Б.А., Лебедев С.В., Фокин Е.П. Фотохимические эффекты в мощном лазере на растворе родомина 6Ж в изо-пропиловом спирте с накачкой импульсными лампами. Квантовая электроника, 1979, т.6, В9, с.2028–2031.
8. Воропаев С.Г., Князев Б.А. Регистрация атомов титана по резонансной флуоресценции, возбуждаемой азотным лазером. В сб. Диагностика плазмы, вып. 5, под. ред. М.И. Пергамента.— М.: Энергоатомиздат, 1986, 304 с.
9. Князев Б.А., Лебедев С.В., Меклер К.И. Получение облака плазмы с заданным составом элементов вблизи поверхности в вакууме. ЖТФ, 1986, т.56, В7, с.1319–1325.
10. Князев Б.А., Лебедев С.В., Фокин Е.П. Мощный лазер на родамине 6Ж с повышенным ресурсом работы. Квантовая электроника, 1983, т.10, В2, с.276–282.
11. Князев Б.А., Мельников П.И. Динамика спектров генерации лазеров на растворах кумарина-1 и оксазина-17, накачиваемых импульсными лампами. Препринт ИЯФ СО АН СССР 90–130, Новосибирск, 1990, 7 с.
12. Князев Б.А., Лебедев С.В., Мельников П.И. Активная штарковская спектроскопия атомного пучка как метод измерения электрических полей. ЖТФ, 1991, т.61, В3, с.6–18.