

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Смирнов Б. М. Физика атома и иона. М., 1986. Гл. 8. [2] Sargol P. K., Kennedy E. T. //Phys. Rev. Lett. 1977. 38. P. 1068. [3] Балашов В. В. и др. //Опт. и спектр. 1970. 28. С. 859. [4] Ho Y. K. //Phys. Reports. 1983. 99. P. 1. [5] Herrick D., Sinanoglu O. //Phys. Rev. 1975. A11. P. 97. [6] Ho Y. K. //J. Phys. B. 1979. 12. P. 387. [7] Варе А., Иванов П. Б., Сенашенко В. С. //Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1982. 23, № 1. С. 49. [8] Kabachnik N. M., Sazhina I. P. //J. Phys. B. 1976. B9. P. 1681. [9] Berezhenko E. G., Kabachnik N. M. //Ibid. 1977. 10. P. 2467. [10] Tweed R. J. //Ibid. 1972. 5. P. 810. [11] Fano U., Prats F. //Proc. Nat. Acad. Sci. India. 1963. A33. P. 196. [12] Бурков С. М., Страхова С. И. //Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1984. 25, № 4. С. 45. [13] Бурков С. М., Страхова С. И. //Там же. 1984. 25, № 3. С. 42. [14] Бурков С. М. и др. //Изв. АН СССР, сер. физ. 1986. 50. С. 1315. [15] Lindle D. W. et al. //Phys. Rev. 1985. A31. P. 714. [16] Балашов В. В., Кабачник Н. М., Сажина И. П. //Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1973. 14, № 6. С. 733. [17] Balashov V. V., Kabachnik N. M., Senashenko V. S. //Abst. Contrib. Papers, XIII ICPEAC, Berlin, 1983. P. 23. [18] Jimenez-Mier J., Denise Caldwell C., Ederer D. L. //Phys. Rev. Lett. 1986. 57. P. 2260.

Поступила в редакцию
23.10.87

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1989. Т. 33, № 1

УДК 539.1

РИДБЕРГОВСКИЕ АТОМЫ И ПОЛУЧЕНИЕ МОНОНАПРАВЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

В. А. Намиот, Е. П. Скороход

(НИИЯФ)

Показано, что при определенных условиях электроны, получаемые при ионизации ридберговских атомов, будут обладать высокой монохроматичностью по энергиям и малым угловым разбросом.

В различных экспериментальных задачах для увеличения точности измерений часто необходимо использовать электроны с малым угловым и энергетическим разбросом. В данной работе показано, что такие электроны можно получать, в частности, при ионизации ридберговских атомов.

В настоящее время техника экспериментальной работы с ридберговскими атомами в достаточной степени развита [1, 2] и ее можно было бы использовать для получения мононаправленных электронов. Мы не будем давать конкретной экспериментальной проработки схемы, а остановимся лишь на принципиальной стороне вопроса.

Напомним, что ридберговскими [1] называются атомы, находящиеся в высоковозбужденных состояниях (главное квантовое число n может принимать значения от 30 до 100). Их размеры пропорциональны n^2 и могут достигать микрона, а ионизация наступает при очень низких, порядка 10^2 — 10^4 В/м, напряженностях электрического поля.

Схема установки для получения ридберговских состояний с участием атомов Хе I приводится в работе [2]. Пучок атомов ксенона в основном состоянии возбуждается электронным ударом в метастабильное состояние $^3P_{0,2}$. Затем пучок проходит область с нулевым электрическим полем ($\leq 0,2$ В/см) между двумя параллельными сетками, где он пересекается с пучком лазера на красителях, накачиваемого N_2 -лазером и настраиваемого таким образом, чтобы метастабильные атомы возбуждались на уровень nf , обычно $31f$, возможен и $50f$.

Далее рассмотрим задачу об ионизации ридберговских атомов в следующей постановке. Пусть имеется капилляр радиуса R , покрытый проводящим материалом, внутри которого присутствуют ридберговские атомы. Размеры этих атомов R' несколько меньше, но сравнимы с R . На некотором расстоянии от конца капилляра расположена проводящая плоскость (анод или сетка), к которой приложено напряжение u_0 , вытягивающее электроны из капилляра.

Наша задача: определить место ионизации ридберговского атома внутри капилляра*, найти волновую функцию, описывающую образовавшиеся после ионизации электроны, и, используя эту волновую функцию, оценить угловой и энергетический разброс, а также поток электронов.

Потенциал внутри капилляра, точнее, та его часть, которая убывает наиболее слабо по мере продвижения от отверстия внутрь, имеет вид

$$u(r; z) = u' J_0 \left(\gamma_1 \frac{r}{R} \right) \exp \left(-\gamma_1 \frac{z}{R} \right). \quad (1)$$

Здесь u' — разность потенциалов между точкой на оси капилляра в том месте, где он заканчивается, и его стенкой; J_0 — функция Бесселя; γ_1 — первый корень уравнения $J_0(\gamma_1) = 0$; z — координата вдоль оси капилляра. Напряженность электрического поля, начиная с которой происходит эффективная ионизация ридберговских атомов, приближенно равна [1, 3]

$$E_{\text{и}} \approx \frac{e^3 m^2}{16 \pi^4 \hbar^4}.$$

Здесь e и m — заряд и масса электрона, $\hbar$ — постоянная Планка. В капилляре такая напряженность достигается при $z = z_1$, где z_1 определяется условием

$$z_1 = \frac{R}{\gamma_1} \ln \left(\frac{16 \pi^4 \hbar^4 u' \gamma_1}{e^3 m^2 R} \right). \quad (2)$$

Введем $z' = z_1 - z$ и запишем уравнение Шрёдингера для волновой функции электрона после ионизации:

$$\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z'^2} \right) \Psi + \left(E_0 + A J_0 \left(\gamma_1 \frac{r}{R} \right) \exp \left(\gamma_1 \frac{z'}{R} \right) \right) \Psi = 0, \quad (3)$$

где

$$A \approx \frac{e^6 m^2 R}{16 \pi^4 \hbar^4 \gamma_1}; \quad E_0 \approx -A.$$

Вблизи оси капилляра, где волновая функция отлична от нуля, функцию Бесселя $J_0(\gamma_1 r/R)$ можно разложить в ряд:

$$J_0 \left(\gamma_1 \frac{r}{R} \right) \approx \left(1 - \frac{\gamma_1^2 r^2}{4 R^2} \right). \quad (4)$$

* Часть атомов будет ионизоваться не в объеме капилляра, а непосредственно на стенках, уменьшая тем самым количество вылетающих электронов. Чтобы уменьшить этот паразитный процесс, достаточно сделать конец капилляра в виде конуса.

Нормируем волновую функцию по потоку:

$$\int \Psi^* \frac{\partial}{\partial z} \Psi r dr = \text{const} = N \quad (5)$$

и, приближенно решая (3), получим

$$\Psi(r; z) \approx \left(\frac{V\sqrt{3} \gamma_1 N}{8\pi R} \right)^{1/2} \exp \left\{ -\frac{(V\sqrt{3} + i) \gamma_1}{4R\hbar} \sqrt{\frac{mA}{2}} \exp \left(\gamma_1 \frac{z'}{2R} \right) r^2 - \right. \\ \left. - \frac{i V\sqrt{3} \gamma_1}{4R} z' + 2i \sqrt{2mA} \frac{R}{\gamma_1 \hbar} \exp(\gamma_1 z'/2R) \right\}. \quad (6)$$

Здесь N — число актов ионизации ридберговских атомов в единицу времени.

Заметим, что вне зависимости от точного значения квантовых чисел, если только волновая функция электронов в ридберговском атоме не зависит от азимутального угла, а характерный масштаб ее изменения — порядка R , то в этом случае электроны после ионизации будут в основном описываться выражением (6).

Используя (6), можно записать оценки для углового и энергетического разброса электронов на выходе из капилляра:

$$\Delta f \sim \left(\int r \left(\Psi^* \frac{\partial}{\partial r} \Psi \right) \Big|_{z=0} dr \right) / \left(\int r \left(\Psi^* \frac{\partial}{\partial z} \Psi \right) \Big|_{z=0} dr \right) \sim \\ \sim \left(\frac{\hbar^2}{R^2 m e u'} \right)^{1/4} \approx (\mathcal{E}_\perp / e u'), \quad (7)$$

$$\frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}} \sim \frac{R}{\gamma_1} \left[\frac{\partial}{\partial z_1} \left(\Psi^* \frac{\partial^2}{\partial z^2} \Psi \right) \Big|_{r=0; z=0} \right] / \left(\Psi^* \frac{\partial^2}{\partial z^2} \Psi \right) \Big|_{r=0; z=0} \sim \\ \sim \frac{e^5 m^2 R}{16 n^4 \hbar^4 u'} \approx E_H / (u' / R). \quad (8)$$

Здесь $\mathcal{E}_\perp$ — минимально возможная, исходя из принципа неопределенности, энергия поперечного движения электрона. Впрочем, из качественных соображений должно быть достаточно ясно, что разброс по углам и энергиям здесь будет минимально возможным. Численно такой разброс электронов при $u \sim 1$ В, $R \sim 1$ мкм и главном квантовом числе $n=50$ составит $\Delta f \sim 1^\circ$ и $\Delta \mathcal{E} / \mathcal{E} \sim 10^{-2}$.

Число актов ионизации ридберговских атомов, дающих вклад в поток мононаправленных электронов N , можно оценить по формуле $PR^2 V_T$, где P — объемная плотность ридберговских атомов, достигающая 10^{15} м^{-3} (10^9 см^{-3}), V_T — их тепловая скорость. Используя эту оценку, удастся определить плотность тока $\mathcal{I}' \sim N/R^2$, которая может достигать 100 мА/м^2 . В области столь низких энергий электронов порядка одного электрон-вольта, где практически не работают никакие из традиционных электронно-оптических методов, такая плотность тока при угловом разбросе $\sim 1^\circ$ может представлять существенный интерес.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Ридберговские состояния атомов и молекул/Под ред. Р. Стеббинса и Ф. Данинга. М., 1985. [2] Kellert F. G. et al./J. Chem. Phys. 1980. 72. P. 3179. [3] Бете Г., Солпитер Э. Квантовая механика атомов с одним и двумя электронами. М., 1960.

Поступила в редакцию
14.10.87