

УДК 544.032.65

**О ВЕЛИЧИНЕ ЭНЕРГИИ ИОНИЗАЦИИ АТОМАРНОГО ИОНА ЗОЛОТА Au<sup>2+</sup>**© 2024 г. Р. Е. Болтнев<sup>1, 2, \*</sup>, А. В. Карабулин<sup>1, 3</sup>, И. Н. Крушинская<sup>2, \*\*</sup>,  
А. А. Пельменёв<sup>2</sup>, В. И. Матюшенко<sup>2</sup><sup>1</sup>Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия<sup>2</sup>Филиал федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН,  
Черноголовка, Россия<sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,  
Черноголовка, Россия

\* E-mail: boltnev@gmail.com

\*\* E-mail: irkrush@gmail.com

Поступила в редакцию 26.03.2024 г.

После доработки 02.04.2024 г.

Принята к публикации 03.04.2024 г.

Анализ спектров люминесценции плазмы, формируемой при лазерной абляции мишени из золота, погруженной в сверхтекучий гелий, при плотности мощности лазерного излучения ниже порога пробоя жидкого гелия показывает, что величина энергии ионизации иона Au<sup>2+</sup> должна быть не менее 34 эВ.

*Ключевые слова:* лазерная плазма, оптическая спектроскопия атомов и ионов

DOI: 10.31857/S0023119324040111 EDN: TPIHNL

В настоящее время в справочных базах данных и литературе наблюдается значительный разброс величин, приводимых для потенциала ионизации двукратно заряженного положительного иона атома золота. Так в базе данных NIST Standard Reference Database 78 [1] приведено значение 30 эВ, вычисленное теоретически, тогда как, например, существенно более раннее значение, полученное экспериментально, составляет 36.6 эВ [2]. На основании новых экспериментальных результатов и ранее предложенной модели, описывающей процесс ионизации атома гелия трехкратно заряженными ( $Z = +3$ ) атомарными ионами металлов в лазерной плазме [3], мы полагаем, что реальная величина данного потенциала не может быть менее 34 эВ.

Как было ранее обнаружено для некоторых металлов, при лазерной абляции металлических мишеней, расположенных в объеме сверхтекучего гелия, наблюдалась люминесценция атомов и молекул гелия при плотностях мощности лазерного излучения ниже пороговой для оптического пробоя жидкого гелия,  $I_{\text{He}} \approx 10$  ГВт/см<sup>2</sup> [4]. Люминесценция атомов и молекул гелия однозначно указывает на наличие в плазме у поверхности мишени ионов гелия, He<sup>+</sup> и He<sub>2</sub><sup>+</sup>, в результате рекомбинации которых с электронами и формируются возбужденные состояния нейтральных атомов и молекул гелия, дающие вклад в люминесценцию [5, 6]. Было установлено [3], что появление ионов гелия связано с фор-

мированием комплекса,  $\text{He} + \text{M}^{3+} \rightarrow \text{HeM}^{3+}$ , и его диссоциацией на ион гелия He<sup>+</sup> и другие фрагменты в реакции:

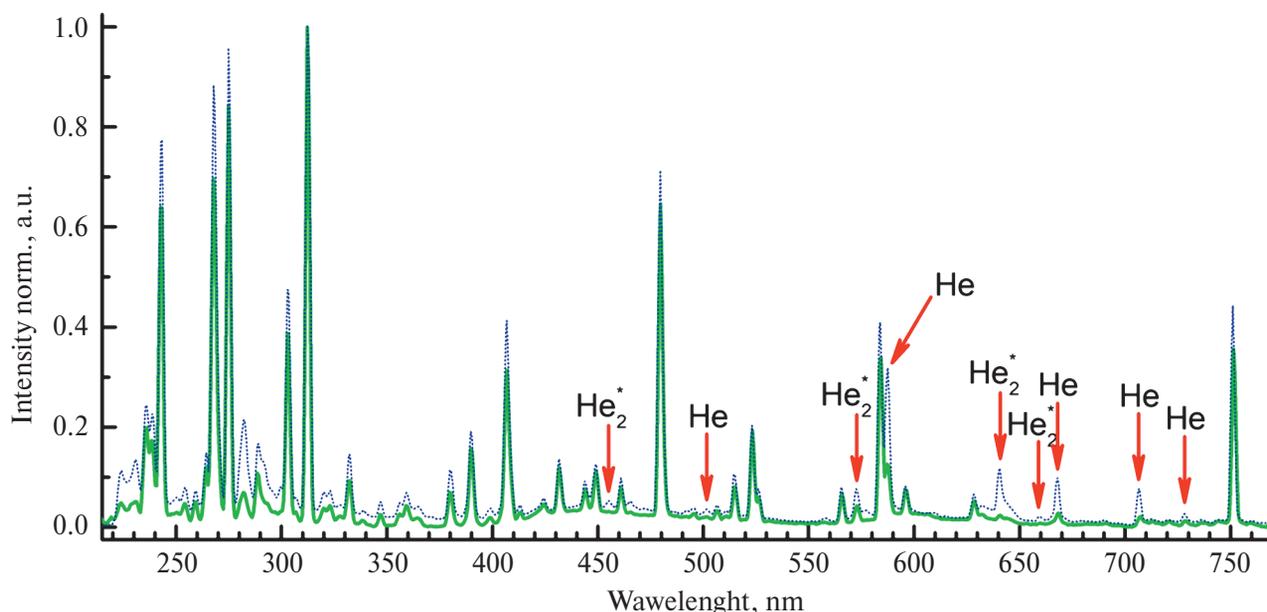


Для реализации этого механизма необходимо, чтобы для атома металла выполнялся положительный баланс реакции, т.е.

$$IE^{2+} - 24.59 - IE > 0, \quad (2)$$

где  $IE$  и  $IE^{2+}$  – энергии ионизации нейтрального атома и двукратно заряженного иона данного металла (в электрон-вольтах), а 24.59 эВ – потенциал ионизации атома гелия.

Подробное описание экспериментальной установки и методики измерений приведено в работе [3]. Для абляции мишени из золота (степень чистоты 99.99%), погруженной в сверхтекучий гелий (при температуре 1.5 К) в шахте оптического криостата, было использовано излучение лазера с плотностями мощности лазерного излучения ниже и выше  $I_{\text{He}}$ , соответственно  $\approx 3.6$  и 28 ГВт/см<sup>2</sup>. На рис. 1 представлено сравнение спектров плазмы у поверхности мишени из золота при плотностях мощности лазерного излучения ниже и выше порога пробоя жидкого гелия (зеленая сплошная и синяя точечная линии соответственно). Красные стрелки показывают положения атомарных линий и молекулярных полос, характерных для атомов и молекул гелия. Видно,



**Рис. 1.** Сравнение экспериментальных спектров плазмы, формирующейся у поверхности мишени из золота при плотностях мощности лазерного излучения ниже и выше порога пробоя жидкого гелия (зеленая сплошная и синяя точечная линии соответственно). Красные стрелки показывают положения атомарных линий и молекулярных полос, характерных для атомов и молекул гелия.

**Таблица 1.** Потенциалы ионизации атомов и ионов металлов, энергетические балансы реакции (1)

Металл	Ni	Co	Ga	Ag	Au	
IE <sup>*</sup> , эВ	7.64	7.88	6	7.58	9.22	
IE <sup>2+*</sup> , эВ	35.19	33.5	30.73	34.8	30.0 <sup>*</sup>	34 / 36.6 <sup>**</sup>
Баланс реакции (1)	<b>2.96</b>	<b>1.03</b>	<b>0.14</b>	<b>2.66</b>	<b>-3.81</b>	<b>0.19 / 2.79</b>

\* – данные из базы данных [1], \*\* – данные из работы [2].

что атомарные линии гелия на 587.6, 667.5, 706.3 и 728 нм, наряду с молекулярными полосами на 573 и 640 нм наблюдались и при плотности мощности ниже пороговой, аналогично спектрам плазмы, наблюдавшихся у мишеней никеля и кобальта, для которых соблюдается положительный баланс реакции (1) [3].

В табл. 1 для золота и ряда металлов, для которых баланс (2) положителен и наблюдается люминесценция атомов и молекул гелия при допороговых величинах плотности мощности, для сравнения приведены потенциалы ионизации атомов и ионов, энергетические балансы реакции (1).

Для атома золота приведены значения потенциалов ионизации из различных источников, причем во втором источнике наряду с экспериментальной величиной IE<sup>2+</sup>, 36.6 эВ, была получена и теоретическая оценка, 34 эВ. Видно, что обе величины удовлетворяют требованию положительного баланса для ионизации атомов гелия в реакции



Таким образом показано, что величина энергии ионизации атомарного иона Au<sup>2+</sup> должна быть не менее 34 эВ.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по темам госзадания ФИЦ химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (№ 122040500073-4) и ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН (№ 124020600049-8).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. NIST Atomic Spectra Database, NIST Standard Reference Database 78, <https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/ionEnergy.html>
2. Korgaonkar A.V., Gopalaraman C.P., Rohatgi V.K. // Int. J. Mass Spectrom. and Ion Physics. 1981. V. 40. P. 127. [https://doi.org/10.1016/0020-7381\(81\)80036-8](https://doi.org/10.1016/0020-7381(81)80036-8)
3. Boltnev R.E., Karabulin A.V., Krushinskaya I.N., Pelmenov A.A., Matyushenko V.I. // High Energy Chem. 2023. V. 57. P. 168. <https://doi.org/10.1134/S0018143923020066>

4. *Sirisky S., Yang Y., Wei W., Maris H.J.* // J. Low Temp. Phys. 2017. V. 189. № 1–2. P. 53. <https://doi.org/10.1007/s10909-017-1786-y>
5. *Tokaryk D.W., Brooks R.L., Hunt J.L.* // Phys. Rev. A. 1993. V. 48. P. 364. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.48.364>
6. *Benderskii A.V., Zadoyan R., Schwentner N., Apkarian V.A.* // J. Chem. Phys. 1999. V. 110. p. 1542. <https://doi.org/10.1063/1.477796>

## ON THE IONIZATION ENERGY OF THE ATOMIC GOLD ION Au<sup>2+</sup>

**R. E. Boltnev<sup>a, b, \*</sup>, A. V. Karabulin<sup>a, c</sup>, I. N. Krushinskaya<sup>b, \*\*</sup>,  
A. A. Pelmenev<sup>b</sup>, V. I. Matyushenko<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, 125412 Moscow, Russia

<sup>b</sup> Branch of the N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, 142432 Chernogolovka, Russia

<sup>c</sup> Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, 142432 Chernogolovka, Russia

\* e-mail: [boltnev@gmail.com](mailto:boltnev@gmail.com)

\*\* e-mail: [irkrush@gmail.com](mailto:irkrush@gmail.com)

Analysis of the luminescence spectra of the plasma formed by laser ablation of a gold target immersed in superfluid helium at a laser power density below the breakdown threshold of liquid helium shows that the ionization energy of the Au<sup>2+</sup> ion should be at least 34 eV.

*Keywords:* laser plasma, optical spectroscopy of atoms and ions

### REFERENCES

1. NIST Atomic Spectra Database, NIST Standard Reference Database 78, <https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/ionEnergy.html>
2. *Korgaonkar A.V., Gopalaraman C.P., and Rohatgi V.K.* // Int. J. Mass Spectrom. and Ion Physics. 1981. V. 40. P. 127. [https://doi.org/10.1016/0020-7381\(81\)80036-8](https://doi.org/10.1016/0020-7381(81)80036-8)
3. *Boltnev R.E., Karabulin A.V., Krushinskaya I.N., Pelmenev A.A., Matyushenko V.I.* // High Energy Chem. 2023. V. 57. P. 168. <https://doi.org/10.1134/S0018143923020066>
4. *Sirisky S., Yang Y., Wei W., Maris H.J.* // J. Low Temp. Phys. 2017. V. 189. № 1–2. P. 53. <https://doi.org/10.1007/s10909-017-1786-y>
5. *Tokaryk D.W., Brooks R.L., Hunt J.L.* // Phys. Rev. A. 1993. V. 48. P. 364. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.48.364>
6. *Benderskii A.V., Zadoyan R., Schwentner N., Apkarian V.A.* // J. Chem. Phys. 1999. V. 110. P. 1542. <https://doi.org/10.1063/1.477796>