

Плазменное излучение пленок натрия, возбужденное медленными электронами

© Б.В. Стеценко, А.И. Щуренко

Институт физики Академии наук Украины,
030339 Киев, Украина

E-mail: stetsen@iop.kiev.ua

(Поступила в Редакцию 23 марта 2000 г.)

Измерено излучение пленок натрия в области энергий фотонов 2.5–5 eV, вызванное бомбардировкой пленок электронами с энергией 300 eV. Показано, что особенность в области 4 eV связана с излучательным распадом поверхностных плазмонов, излучение при 4.6 и 4.68 eV обусловлено радиационным распадом мультипольных плазмонов.

Развитие теоретических и экспериментальных исследований динамического экранирования поля поверхностью металла [1–6] позволило получить дополнительные данные о дисперсии поверхностных плазмонов и предсказать новую ветвь поверхностных волн (мультипольные плазмоны), взаимодействующую с объемными световыми волнами на частоте $\omega = 0.8\omega_p$ (ω_p — плазменная частота).

В настоящей работе представлены результаты исследований мультипольных плазмонов в пленках натрия, вызванных бомбардировкой поверхности электронами низких энергий.

1. Методика эксперимента

Исследуемые пленки приготавливались путем термического испарения металлического натрия чистотой 99.99% со скоростью 10 nm/s на танталовую ленту. Давление остаточных газов в экспериментальной лампе составляло 10^{-10} Torr. Напыление проводилось из медного источника. Толщина исследуемой пленки измерялась кварцевыми весами. Танталовая лента могла как охлаждаться до азотной температуры, так и нагреваться до температуры плавления натрия и выше. Как показали снимки в растровом электронном микроскопе, лента имела статистически неровную поверхность с преимущественным периодом 100–200 nm. Выбор материала испарителя и подложки обеспечивал высокую чистоту пленок Na из-за отсутствия взаимного растворения металлов. Исследовались пленки в диапазоне толщин 20–2000 nm, причем каждая пленка напылялась на подложку, предварительно очищенную прогревом.

Излучение натрия возбуждалось электронным пучком с энергией 300 eV, площадь сечения которого на образце составляла 1 mm^2 , а величина тока $3 \cdot 10^{-5}$ A. Выбор таких параметров исключал термический нагрев исследуемой пленки или какие-либо ее изменения под действием электронного пучка. Угол падения электронов составлял 45° . Излучение выводилось из прибора через сапфировое окно и фокусировалось на входную щель монохроматора. Спектры излучения регистрировались фо-

тоэлектронным умножителем в режиме счета одноэлектронных импульсов в диапазоне 2.5–5 eV. Спектральная чувствительность фотоумножителя измерялась методом, описанным в [7]. В диапазоне измерений ширина пропускания кварцевого монохроматора изменялась от 0.04 eV при энергии фотонов 5 до 0.09 eV при энергии 2.5 eV. Интенсивность монохроматического излучения пленок Na составляла 200–300 photon/s в максимуме.

Регистрировался спектр излучения, выходящего по нормали к поверхности образца в телесном угле 7° . Такая апертура позволяла свести к минимальной величине интенсивность переходного излучения. Наблюдалось излучение, связанное с радиационным распадом поверхностных плазмонов, волновой вектор которых равен обратной величине периода шероховатостей \mathbf{q} , т.е. $\mathbf{q} + \mathbf{k}_{sp} = 0$, \mathbf{k}_{sp} — импульс поверхностного плазмона [8,9].

2. Результаты и их обсуждение

Спектры излучения пленок натрия, напыленные и измеренные при температуре 77 K, приведены на рис. 1. По мере увеличения толщины пленки положение максимума смещалось в сторону низких энергий квантов, а интенсивность излучения в максимуме уменьшалась. В интервале толщин 40–200 nm наблюдалось расщепление спектра.

При нагреве пленки толщиной 1700 nm, напыленной на охлажденную до 77 K подложку (рис. 1), до температуры 369 K (температура плавления натрия 370.8 K при давлении 760 Torr) и регистрации спектра излучения при этой же температуре в спектре излучения помимо основного пика, связанного с радиационным распадом поверхностных плазмонов, наблюдается пик излучения при энергии кванта 4.6 eV (кривая 1 на рис. 2). С последующим уменьшением температуры подложки до комнатной амплитуда дополнительного высокочастотного пика уменьшается, а положение максимума оказывается при большей энергии квантов — 4.68 eV (кривая 2 на рис. 2). При дальнейшем охлаждении до 77 K этот пик не

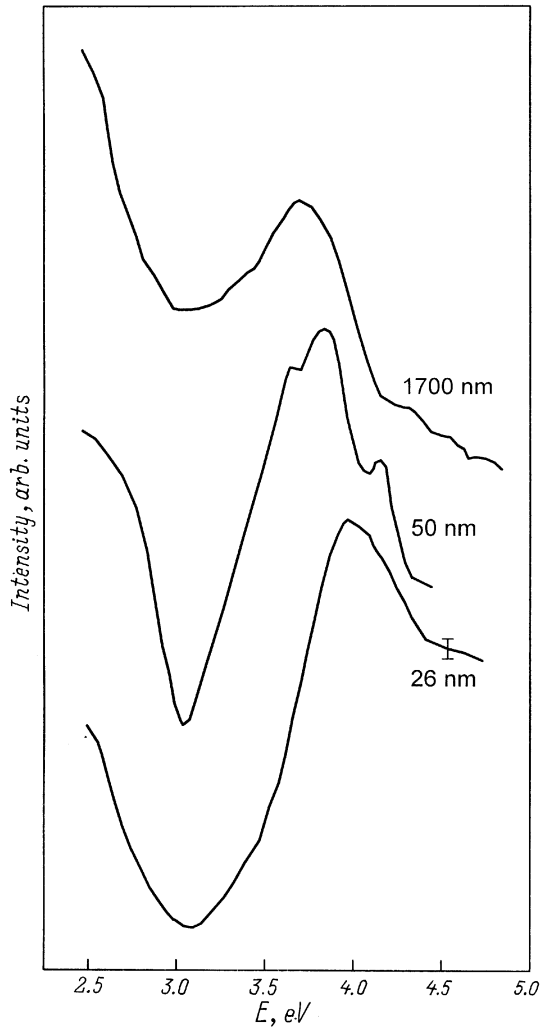


Рис. 1. Спектры излучения пленок натрия, напыленных на подложку, охлажденную до 77 К (толщина пленок указана на рисунке). Измерения сделаны при этой же температуре.

наблюдается (кривая 3 на рис. 2). При повторении цикла прогрев–охлаждение образца спектр воспроизводится.

В представленных спектрах излучения наиболее интересными являются высокочастотные пики 4.6 и 4.68 eV, возникающее при прогреве пленки натрия. Положения их близки к частоте мультипольного плазмона $0.8\omega_p = 4.58$ eV [5]. Такие максимумы, связанные с мультипольными плазмонами, впервые зарегистрированы в спектре характеристических потерь энергии электронами в пленках натрия [4,5]. Совпадение частот в нашем случае с указанными данными однозначно свидетельствует о наблюдении в нашем эксперименте радиационного распада мультипольных плазмонов. Возникает вопрос, в чем причина проявления мультипольных плазмонов в нашем эксперименте. В экспериментальных данных по электрон-фотонной эмиссии, в которых пленка натрия напылялась на зеркальную поверхность подложки [10], так же как и в спектрах, приведенных на рис. 1, такое излучение не отмечалось. Это тем более удиви-

тельно, что в экспериментах по фотоэффекту [2,6,11] влияние мультипольных плазмонов на квантовый выход фотоэффекта доказано убедительно. В нашей работе по исследованию фотоэффекта из пленок натрия, напыленных на зеркально гладкую поверхность [12] (вставка на рис. 2), также отмечено возрастание квантового выхода фотоэффекта при энергии фотонов, близкой к энергии мультипольного плазмона. Квантовый выход фотоэлектронов из пленок натрия толщиной 1000 nm возрастает на частоте 4.5 eV, т.е. на частоте, близкой к частоте мультипольного плазмона (вставка, кривая *b* на рис. 2). Повышение квантового выхода фотоэффекта на частоте

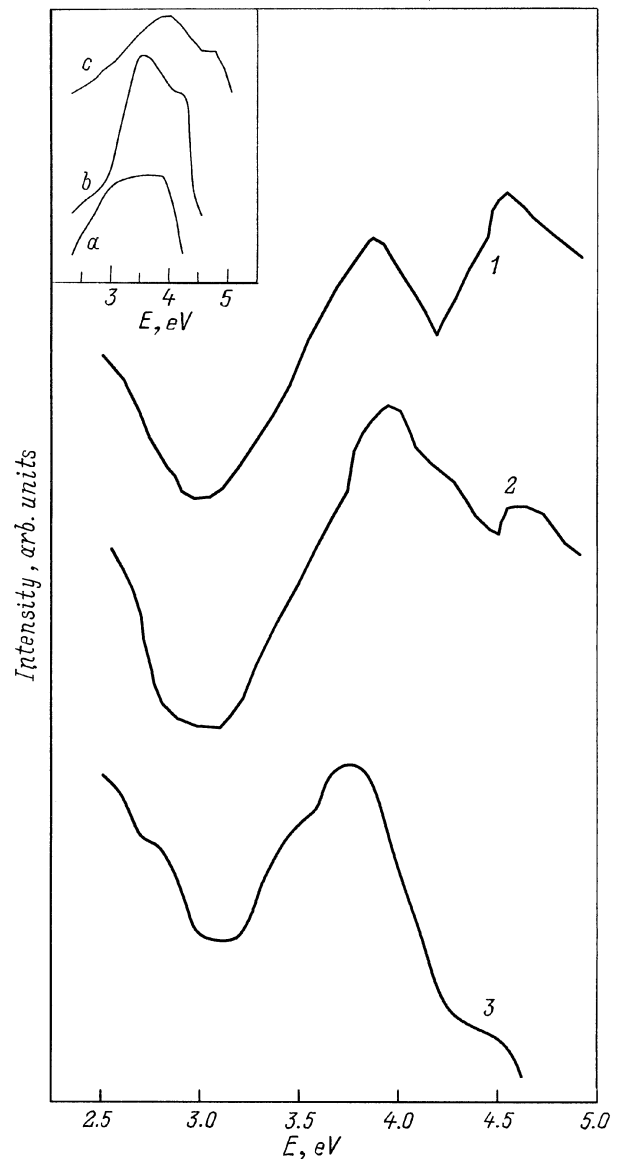


Рис. 2. Спектры излучения пленки натрия толщиной 1700 nm, напыленной на охлажденную до 77 К подложку. 1 — измеренный при температуре пленки 369 К; 2 — при последующем охлаждении до 293 К; 3 — до 77 К. На вставке представлены энергетические распределения фотоэлектронов при различных значениях энергии фотонов (eV): *a* — 4.25, *b* — 4.5, *c* — 5 [12].

мультипольного плазмона связано с увеличением поля световой волны на поверхности, которое происходит вследствие взаимодействия возбуждающей фотоэффект объемной электромагнитной волны с поверхностью. Такое взаимодействие возможно, если выполняется закон сохранения компоненты импульса, параллельной поверхности. Это не противоречит дисперсии мультипольных плазмонов [5]. Следовательно, излучение, связанное с радиационным распадом этих плазмонов, должно наблюдаться. Тот факт, что оно до сих пор не наблюдалось, связан, по-видимому, с малой величиной фазового объема, занимаемого частью дисперсионной кривой $\mathbf{k}_{mp} < \omega/c$ (\mathbf{k}_{mp} — импульс мультипольного плазмона). Бомбардирующие поверхность электроны возбуждают в основном волны с волновым вектором $\mathbf{k}_{mp} = \frac{\omega}{c\sqrt{mc^2/2E}}$ [8]. Поскольку мы бомбардировали поверхность электронами с энергией 300 eV, то $\mathbf{k}_{mp} \sim 30\omega/c$. Это означает, что для большей части поверхностных волн, занимающей основную долю фазового объема, взаимодействие с объемными волнами запрещено из-за того, что $\mathbf{k}_{mp} < \omega/c$. Для того чтобы такое взаимодействие осуществлялось, необходимо наличие на поверхности неоднородностей с "периодом" $(\mathbf{k}_{mp}/2\pi)^{-1}$ [8,9]. По-видимому, в нашем случае при прогреве пленки натрия почти до температуры плавления поверхность пленки "огрубляется" в масштабе $q^{-1} \sim 10-100 \text{ \AA}$. Тогда выполняется закон сохранения импульса, т.е. $\mathbf{q} + \mathbf{k}_{mp} = 0$, что приводит к взаимодействию поверхностных и объемных волн. Другой вероятный механизм состоит в том, что мультипольные плазмоны, рассеиваясь на шероховатостях, преобразуются в плазмоны с малым волновым вектором $\mathbf{k}_{mp} < \omega/c$ [9]. Если это так, то длина пробега мультипольных плазмонов должна быть порядка длины волны света в вакууме, т.е. 400 nm. Появление шероховатостей при нагреве пленки связано с тем, что ее температура превышает температуру "огрубления" поверхности T_R , при которой поверхность становится негладкой, претерпевая фазовый переход (the roughening transition) [13]. По экспериментальным данным, приведенным в работе [13], $T_R = (0.6-0.7)T_m$ (T_m — температура плавления). Отсюда T_R натрия — 230 К. Поэтому для комнатной температуры и выше выполняются условия "огрубления" исследуемой пленки.

Изменение шероховатости при напылении пленок натрия разных толщин происходит даже при температуре 77 К, что следует из спектров поверхностных плазмонов (рис. 1). При малой толщине напыленного слоя (26 nm) профиль пленки натрия достаточно точно повторяет профиль подложки [9]. С увеличением толщины, как видно из рис. 1, наблюдается смещение основного максимума в сторону низких энергий квантов, расщепление на три пика, изменение профиля пика. Все это качественно свидетельствует об изменении спектра поверхностных шероховатостей [14]. Так, смещение максимума в сторону низких энергий означает, что шероховатости изменяют закон дисперсии поверхностных плазмонов

и появляются более мелкоструктурные шероховатости. Наиболее вероятно, что в основном смещение связано с расширением спектра поверхностных шероховатостей в сторону уменьшения периода, так как со сдвигом частоты уменьшается и интенсивность излучения [14].

Таким образом, в работе впервые экспериментально обнаружено излучение, связанное с радиационным распадом мультипольных плазмонов, при нагревании пленок натрия выше температуры "огрубления" поверхности (roughening transition).

Список литературы

- [1] P.J. Feibelman. Phys. Rev. **B9**, 12, 5077 (1974).
- [2] L. Wallden. Phys. Rev. Lett. **54**, 9, 943 (1985).
- [3] K.J. Song, D. Heskett, H.L. Dai, A. Liebsch, E.W. Plummer. Phys. Rev. Lett. **61**, 12, 1380 (1988).
- [4] K.-D. Tsuei, E.W. Plummer. Phys. Rev. Lett. **64**, 1, 44 (1990).
- [5] K.-D. Tsuei, E.W. Plummer, A. Liebsch, E. Pehlke, K. Kempa, P. Bakshi. Surf. Sci. **247**, 302 (1991).
- [6] Г.А. Катрич, В.В. Климов, Н.В. Петрова, И.Н. Яковкин. Изв. РАН **58**, 10, 7 (1994).
- [7] А.И. Щуренко, Б.В. Стеценко, В.С. Лысенко, И.П. Фесенко. ЖПС **35**, 2, 344 (1981).
- [8] E. Kretschmann, T.A. Callcott, E.T. Arakawa. Surf. Sci. **91**, 237 (1980).
- [9] Поверхностные поляритоны / Под ред. В.М. Аграновича, Д.Л. Миллса. Наука, М. (1985). 525 с.
- [10] A. Shchurenko, Yu. Kulyupin, B. Stetsenko. Solid State Commun. **33**, 1, 141 (1980).
- [11] H.J. Levinson, E.W. Plummer, P.J. Feibelman. Phys. Rev. Lett. **43**, 13, 952 (1979).
- [12] И.И. Зеленская, Ю.А. Кулюпин, Б.В. Стеценко, В.И. Шаталов, А.И. Щуренко. ФТТ **28**, 4, 1208 (1986).
- [13] J. Lapujoulade. Surf. Sci. Report **20**, 191 (1994).
- [14] M.S. Chang, T.A. Callcott, E. Kretschmann. Surf. Sci. **91**, 245 (1980).