

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛА LiF:F_2^- С СУБВОЛНОВЫМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

В.Н.Конопский, С.К.Секацкий, В.С.Летохов

*Институт спектроскопии РАН
142092 Троицк, Московская обл., Россия*

Поступила в редакцию 7 октября 1994 г.

При облучении игл автоэлектронного микроскопа, изготовленных из кристаллов LiF:F_2^- , аргоновым лазером получены фотоэлектронные изображения острий игл с увеличением $\sim 3 \cdot 10^4$. Изображения, полученные при облучении различными длинами волн лазера, существенно отличаются друг от друга, что позволяет говорить о реализации нового метода исследования поверхности — химически-селективной проекционной фотоэлектронной микроскопии. Полученные изображения анализируются в связи с результатами исследований лазерного селективного внешнего фотоэффекта в LiF:F_2^- и других диэлектрических кристаллах.

Для решения многих задач физики поверхности, микроэлектроники, биофизики и т.д. необходимо использование таких методов исследования, которые позволяют не только исследовать поверхность различных образцов с высоким пространственным разрешением, но и дают возможность идентифицировать находящиеся на поверхности молекулы или другие структуры малых размеров (то есть обладают высокой “химической селективностью”). Вместе с тем методы автоэлектронной (автоионной) и сканирующей туннельной микроскопии, обладая высоким, вплоть до атомарного, разрешением, имеют в то же время довольно низкую химическую селективность [1, 2]. Для преодоления этого недостатка ранее предлагалось использовать лазерную селективную фотоионизацию молекул, адсорбированных на острие иглы автоэлектронного микроскопа [3], однако проведенные эксперименты выявили значительные трудности, связанные с десорбцией, декомпозицией и миграцией по поверхности иглы адсорбированных молекул в интенсивных лазерных полях (краткий обзор проведенных экспериментов см. в [4]). Недавно для некоторых диэлектрических кристаллов ($\text{CaF}_2:\text{Sm}^{2+}$, LiF:F_2^- , $\text{ZrO}_2:\text{Nd}^{3+}$ и др.) был обнаружен лазерный селективный внешний фотоэффект [4–8], что позволило сформулировать новый подход к рассматриваемой проблеме, в рамках которого можно преодолеть трудности, присущие исследованию адсорбированных молекул [9]. О первом наблюдении химически-селективного изображения поверхности кристаллов LiF с F_2^- -центрами окраски с пространственным разрешением большим, чем оптическая длина волны, сообщается в данной работе.

Схема эксперимента представлена на рис.1. Иглы изготовлялись из кристаллов LiF:F_2^- , синтезированных в Институте общей физики РАН, методом механического скола и травления в концентрированной соляной кислоте. Иглы длиной 3–5 мм крепились сплавом Вуда к металлическому электроду, на который подавалось напряжение $U = -2,5$ кВ. На острие иглы линзой с фокусным расстоянием $f = 17$ см фокусировалось излучение аргонового лазера мощностью $W \simeq 15$ мВт. Эмитируемые с поверхности иглы фотоэлектроны направлялись электрическим полем на заземленный вход сборки МКП–флуоресцентный экран, находящийся на расстоянии $R \simeq 10$ см от острия. В экспериментальной камере поддерживался вакуум на уровне $\sim 4 \cdot 10^{-7}$ торр. Формируемое на

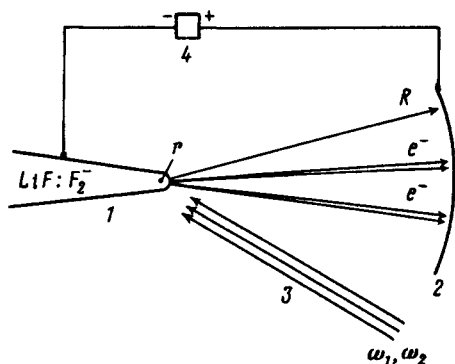


Рис.1. Принципиальная схема лазерного проекционного фотоэлектронного микроскопа: 1 — игла из исследуемого материала, 2 — сборка МКП-флуоресцентный экран, 3 — лазерное излучение, 4 — источник высоковольтного напряжения

выходе сборки оптическое изображение снималось телекамерой, совмещенной с компьютерной системой обработки изображений Аргус-50 фирмы Хамаматцу Фотоникс К.К. Ход эксперимента контролировался ЭВМ в режиме реального времени.

Исследуемые образцы LiF:F_2^- (концентрация F_2^- -центров составляла величину $1,4 \cdot 10^{16} \text{см}^{-3}$) обладали заметной, порядка $10^{11} \text{Ом}\cdot\text{см}$, проводимостью, что позволяло надеяться на достижение при работе фотоэлектронного микроскопа увеличения, определяемого формулой

$$M \simeq \frac{R}{\chi r}, \quad (1)$$

аналогично автоэлектронному проектору с металлическими иглами [1]. Здесь r — эффективный радиус кривизны острия иглы, численное значение коэффициента χ лежит в области 1,5–2. Кривизна острия иглы r и коэффициент увеличения M определялись из сравнения фотоэлектронного изображения острий с их изображениями в атомно-силовом и электронном микроскопах; при этом справедливость формулы (1) качественно была подтверждена. На рис.2. представлены фотоэлектронные изображения одной из LiF:F_2^- игл, полученных при облучении её видимыми (рис.2а) и ультрафиолетовыми (рис.2б) линиями аргонового лазера. Изображения обладали хорошей воспроизводимостью, их интенсивность во много раз превышала уровень шума. Как видно из рис.2, эти изображения значительно отличаются друг от друга и несут различную информацию об исследуемой поверхности. При этом на обоих изображениях можно выделить отдельные яркие фотоэмитирующие центры с характерным расстоянием между ними порядка 100 нм; эти центры различны для условий ультрафиолетового и видимого облучений.

На наш взгляд, приведенные результаты можно рассматривать как демонстрацию первой успешной реализации лазерного фотоэлектронного проекционного микроскопа, обладающего одновременно химической селективностью и высоким пространственным разрешением. Для определения природы фотоэмитирующих центров необходимы дальнейшие исследования. Однако уже сейчас можно отметить следующее: для кристаллов LiF:F_2^- нами ранее был обнаружен селективный внешний фотоэффект: фотоэмиссия, наблюдаемая при облучении таких кристаллов лазерным излучением, была обусловлена прямой одно- или двухступенчатой фотоионизацией F_2^- -центров окраски, тогда как фотоэмиссия, наблюдаемая в тех же условиях с поверхности номинально чистых

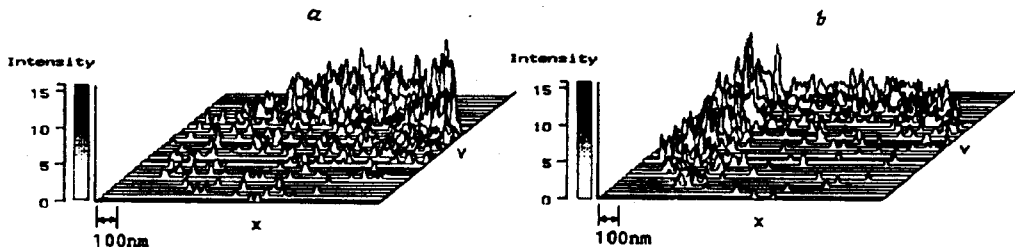


Рис.2. Фотоэлектронное изображение поверхности иглы, изготовленной из LiF:F_2^- , с радиусом кривизны $r \sim 3 \mu\text{м}$, и увеличением $\sim 3 \cdot 10^4$: *a* — при облучении видимым излучением Ar^+ -лазера, *b* — при облучении ультрафиолетовым излучением Ar^+ -лазера

кристаллов LiF , была гораздо менее интенсивна [7, 8]. Это означает, что наблюдаемые в соответствующих экспериментальных условиях фотоэлектроны рождаются непосредственно вблизи F_2^- -центров окраски и их регистрация с высоким пространственным разрешением позволяет визуализировать расположение этих центров на поверхности кристалла LiF . Среднее расстояние между F_2^- -центрами окраски в исследуемых образцах составляло величину около 40 нм, что при глубине выхода электронов порядка 1–10 нм [10] соответствует среднему расстоянию между фотоэлектронными изображениями таких центров $l \sim 100$ нм. Из-за наличия у фотоэмитированных электронов некоторой кинетической энергии поперечного движения E_0 минимально разрешимое расстояние определяется формулой [3]

$$l_{\min} \simeq 2\chi r \left(\frac{E_0}{eU} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

и для $E_0 = 0,1$ эВ, $U = 2,5$ кВ составляет величину ~ 60 нм. Поскольку $l > l_{\min}$, то наблюдение отдельных F_2^- -центров окраски в данных экспериментальных условиях представляется вполне возможным.

Авторы хотели бы поблагодарить Т.Т. Басиева за предоставленные образцы LiF:F_2^- и фирму Хамаматцу Фотоникс К.К. за предоставленное во временное пользование оборудование. Исследования поддерживались Российским Фондом Фундаментальных Исследований и министерством обороны США через Аризонский университет.

1. J.A.Panitz, *Meth.Exp.Phys.* **23**, 350 (1985).
2. *Scanning Tunneling Microscopy I and II*, eds. R. Wiesendanger and H.-J. Gütherodt (Springer-Verlag, Berlin, 1992).
3. В.С.Летохов, *Квант.Эл.* **2**, 930 (1975).
4. V.S.Letokhov and S.K.Sekatskii, *Inst.Phys.Conf.Ser.* **128**, 241 (1992).
5. В.С.Летохов, С.К.Секацкий, С.Б.Миров, *Письма в ЖЭТФ* **54**, 473 (1991).
6. V.S.Letokhov, S.K.Sekatskii, and S.B. Mirov, *Opt.Commun.* **95**, 260 (1993).
7. В.С.Летохов, С.К.Секацкий, *Опт. Спектр.* **76**, 303 (1994).
8. V.S.Letokhov, S.K.Sekatskii, T.T.Basiev, and V.V.Ter-Mikirtychev, *Appl. Phys.* **A58**, 467 (1994).
9. V.S.Letokhov and S.K.Sekatskii, *Appl. Phys.* **B55**, 177 (1992).
10. O.H.Griffith and G.F.Rempfer, *Adv. Opt. El. Micr.* **10**, 269 (1987).