

05;07;10

Люминесценция кристаллов под воздействием субнаносекундного электронного пучка

© Е.И. Липатов, В.Ф. Тарасенко, В.М. Орловский,
С.Б. Алексеев, Д.В. Рыбка

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск
E-mail: lipatov@loi.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 25 октября 2004 г.

Показано, что субнаносекундный лавинный электронный пучок (СЛЭП), формируемый в воздухе при атмосферном давлении, обеспечивает интенсивную люминесценцию синтетического рубина и природного сподумена.

1. Исследование люминесценции кристаллов, вызванной внешним воздействием, является одним из важных элементов спектрального анализа твердых тел, позволяющего определить внутреннюю структуру образца (химический состав, наличие дефектов, примесей, внутренних напряжений и т.д.) [1]. Возбуждение люминесценции электронным пучком, или катодолюминесценция, позволяет проводить спектральный люминесцентный анализ при комнатной температуре практически всех неметаллических твердых тел. Однако при исследовании классической катодолюминесценции необходимо обеспечивать вакуумирование образца и сток наведенного заряда с его поверхности [2], что усложняет условия эксперимента.

В [2–5] было продемонстрировано, что использование сильноточных электронных пучков наносекундной длительности для возбуждения импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) позволяет проводить исследования в воздухе атмосферного давления. При этом спектры ИКЛ демонстрируют высокое разрешение и тонкую структуру, так же как спектры фотолюминесценции при криогенных температурах [4]. Тем не менее несмотря на очевидные преимущества, до последнего времени ИКЛ характеризовал существенный недостаток, а именно необходимость применения для генерации электронного пучка в ускорителях вакуумных диодов, которые требовали непрерывной откачки во время

работы, а отпаянные электронные трубки имели малый срок службы. Это уменьшало привлекательность данного метода для экспресс-диагностики твердых образцов.

Недавно в [6–9] был реализован новый способ формирования субнаносекундных лавинных электронных пучков (СЛЭП [7]) в газовых диодах с амплитудой тока пучка в десятки-сотни ампер. При этом газовые диоды наполнялись различными газами, в том числе воздухом при атмосферном давлении. Таким образом, возникла возможность получать плотные электронные пучки в той же газовой среде, где находились образцы кристаллов.

Целью данной работы является исследование возможности использования СЛЭП для спектрального люминесцентного анализа. Для этого ИКЛ возбуждалась субнаносекундным электронным пучком в синтетическом рубине и природном сподумене.

2. Для возбуждения ИКЛ образцов использовался малогабаритный рентгеновский аппарат „НОРА“ [10], в котором рентгеновская трубка была заменена газовым диодом. Конструкция подобного газового диода описана в [8]. В данных экспериментах диод был заполнен окружающим воздухом. Вывод пучка электронов осуществлялся через фольгу или сетку. Данный ускоритель обеспечивал импульс электронного пучка длительностью 0.2 ns по полувысоте. Частота следования импульсов была ~ 3 Hz, а плотность тока пучка длительностью 0.2 ns по полувысоте. Частота следования импульсов была ~ 3 Hz, а плотность тока пучка на выходе из AlBe фольги толщиной 40 μm составляла ~ 40 A/cm² [9]. На рис. 1 приведено распределение электронов по энергии на расстоянии от фольги 5 см. Максимуму распределения соответствует энергия электронов ~ 80 keV.

Исследуемыми образцами являлись синтетический рубин ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ с примесью Cr^{3+}) и природный сподумен ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ с примесью Mn^{2+} и Cr^{3+}). Рубин розовой окраски имел форму стержня длиной 160 mm и диаметром 8 mm. Образец сподумена имел светло-серый цвет и неправильную форму с габаритами 60 $\times$ 20 $\times$ 10 mm. Одна из его сторон была отполирована.

Образцы помещались на расстояние 5 см от фольги диода. Измерения проводились в воздушной среде при нормальных условиях. Свечение ИКЛ по световоду подавалось на спектрограф EPP-2000C (Stellar-Net Inc.), связанный с компьютером. Данный спектрограф позволяет регистрировать спектры излучения в диапазоне от 200 до 850 nm со

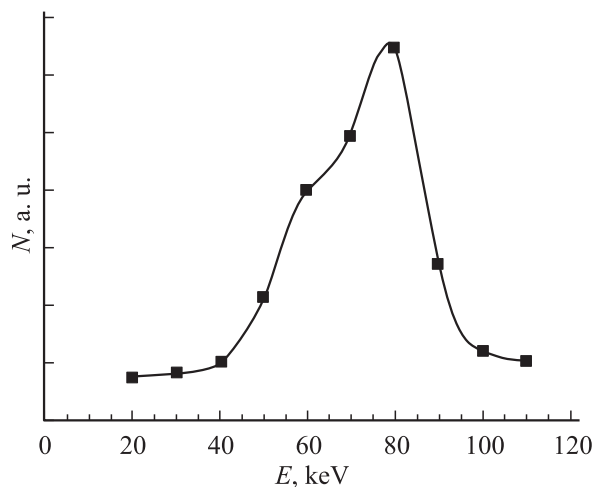


Рис. 1. Распределение электронов по энергии на расстоянии 5 см от фольги диода. Ускоритель „НОРА“.

спектральным разрешением 1.5 nm. Спектр ИКЛ записывался после накопления 100 импульсов. Из полученного спектра вычиталась темновая составляющая и производился учет спектральной чувствительности спектрографа и пропускания световода. Вид полученных спектров стабильно повторялся от опыта к опыту (было проведено 10 опытов).

3. На рис. 2 показаны спектры ИКЛ синтетического рубина (верхний спектр) и природного сподумена (нижний спектр). ИКЛ рубина демонстрирует узкую линию с максимумом при 693 nm и шириной по полувысоте 3.5 nm. Данная линия содержит в себе перекрывающиеся *R*-линии хрома различной интенсивности [2–5]. Кроме того, можно отметить широкое плато в области 655–735 nm с интенсивностью не более 10% от интенсивности доминирующей линии. Данное плато можно отнести к слабым перекрывающимся *N*-и *S*-линиям хрома [2,4,5]. Визуально свечение ИКЛ рубина имело красный цвет.

Спектр ИКЛ сподумена представляет собой широкую полосу в диапазоне 520–760 nm с максимумом при 600–608 nm и шириной по полувысоте 80 nm. Данная полоса связана ионами Mn^{2+} , которые присутствуют в природном сподумене в виде примеси [2,5]. На

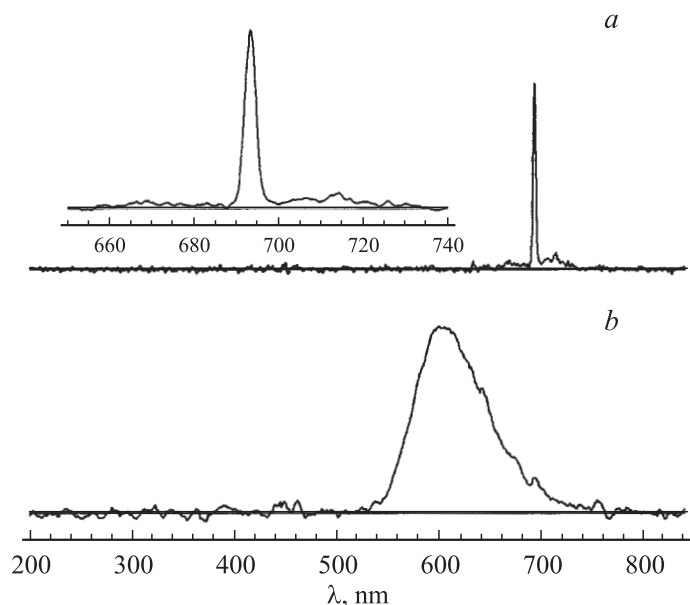


Рис. 2. Спектры импульсной катодолуминесценции синтетического рубина (*a*) и природного сподумена (*b*). На вставке — спектр ИКЛ синтетического рубина в увеличенном масштабе. Источник возбуждения — ускоритель электронов „НОРА“.

длинноволновом крыле данной полосы присутствует особенность при 693 nm, однако ее интенсивность невелика. Возможно, данная слабая линия связана с примесью Cr^{3+} , которая наряду с Mn^{2+} присутствует в природном сподумене. Для уверенной регистрации линии хрома в спектре ИКЛ сподумена необходимо охлаждать образец до температур менее 100 K [11]. Визуально свечение ИКЛ сподумена имело оранжевый цвет.

4. Таким образом, в данной работе впервые продемонстрирована возможность использования СЛЭП для исследования структуры неметаллических твердых тел в воздушной среде при нормальных условиях. При субнаносекундной длительности импульса тока пучка за 100 импульсов возбуждения получены спектры ИКЛ синтетического рубина и природного сподумена.

Отметим, что спектры ИКЛ синтетического рубина и природного сподумена, полученные при субнаносекундном возбуждении, практически не отличаются от спектров ИКЛ подобных кристаллов, полученных при наносекундной длительности импульса электронного пучка [2,5].

СЛЭП может найти широкое применение для спектрального люминесцентного экспресс-анализа как природных, так и синтетических материалов. Предположительно, в виду малой длительности СЛЭП, его использование позволит получать дополнительную информацию при исследовании свойств диэлектриков и полупроводников.

Список литературы

- [1] *Марфуни А.С.* Спектроскопия, люминесценция и радиационные центры в минералах. М.: Наука, 1975. 327 с.
- [2] *Соломонов В.И.* Импульсная катодолуминесценция конденсированных сред: Дис. д.ф.-м.н. Екатеринбург: Институт электрофизики УО РАН. 1996. 267 с.
- [3] *Михайлов С.Г., Осипов В.В., Соломонов В.И.* // ЖТФ. 1993. Т. 63. № 2. С. 52–64.
- [4] *Месяц Г.А., Соломонов В.И., Михайлов С.Г.* и др. // ДАН. 1994. Т. 339. № 6. С. 757–760.
- [5] *Соломонов В.И., Михайлов С.Г., Дейкун А.М.* // Оптика и спектроскопия. 1996. Т. 80. № 3. С. 447–458.
- [6] *Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. № 10. С. 29–35.
- [7] *Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А.* // Изв. вузов. Физика. 2003. № 3. С. 94–95.
- [8] *Тарасенко В.Ф., Шпак В.Г., Шунайлов С.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. № 21. С. 1–6.
- [9] *Алексеев С.Б., Губанов В.П., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. № 20. С. 35–41.
- [10] *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
- [11] *Walker G., El Jaer A., Sherlock R.* et al. // J. Luminesc. 1997. V. 72–74. P. 278–280.