

02

Спектрально-кинетические закономерности свечения кристаллов Ga₂O₃ при возбуждении пучком электронов наносекундной и субнаносекундной длительности

© В.И. Олешко^{1,2}, В.Ф. Тарасенко^{1,2}, Д.В. Белоплотов¹, С.С. Вильчинская²

¹ Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН,
634055 Томск, Россия

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия

e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 07.05.2018 г.

Исследованы спектрально-кинетические характеристики свечения кристаллов Ga₂O₃, легированных Sn и Fe, при возбуждении пучком электронов наносекундной длительности. В кристалле, легированном Fe, в послесвечении обнаружена новая полоса катодолюминесценции с максимумом при $\lambda_m = 315$ nm. Проведено сравнение с данными, полученными при субнаносекундной длительности импульса тока пучка. Показано, что при увеличении длительности импульса тока пучка основной вклад в свечение образцов дает импульсная катодолюминесценция в области 300–450 nm.

DOI: 10.21883/OS.2018.11.46816.118-18

Введение

Кристаллы Ga₂O₃ последние годы исследуются различными научными группами, в том числе начато изучение люминесценции данных кристаллов при возбуждении пучком электронов и УФ излучением [1–5]. Рассматривается возможность применения кристаллов Ga₂O₃ для создания датчиков излучения Вавилова–Черенкова (ИВЧ) в установках типа ТОКАМАК [4,5].

В работе [4] было показано, что спектры свечения кристаллов Ga₂O₃, возбуждаемых пучком электронов и УФ излучением, существенно зависят от используемого легирования. Наибольшую интенсивность при возбуждении пучком электронов кристаллов Ga₂O₃, легированных Sn, имеет полоса импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) в области 300–450 nm. Также в этой области при возбуждении УФ излучением эксимерной лампы регистрируется полоса фотолюминесценции. Кроме того, в кристалле Ga₂O₃, легированном Fe, при возбуждении пучком убегающих электронов с длительностью импульса тока на полувысоте ~ 100 ps и эксимерной лампой с длиной волны 222 nm появляется вторая полоса в области 650–900 nm. Интенсивность катодолюминесценции в области 300–450 nm при этом уменьшается. Причем при возбуждении излучением эксимерной лампы интенсивность фотолюминесценции в области 300–450 nm в кристалле, легированном Fe, уменьшалась существенно больше, чем при облучении электронным пучком субнаносекундной длительности, и на спектрограммах практически не была заметна.

ИВЧ в работах [4,5] было зарегистрировано только в области 250–300 nm. В этой области исследованные кристаллы Ga₂O₃ были еще прозрачны, а катодолюминесценция имела малую интенсивность.

Один из вопросов, который возникает при создании датчиков ИВЧ, является возможность определения длительности импульса тока пучка убегающих электронов на установках типа ТОКАМАК, которая на настоящее время может быть оценена только по длительности импульсов рентгеновского излучения [6–8].

Цель данной работы — определить спектрально-кинетические характеристики излучения кристаллов Ga₂O₃, легированных Sn и Fe, при возбуждении пучком электронов с длительностью импульса $\tau \approx 12$ ns и сравнить их с данными, полученными при субнаносекундной длительности импульса тока пучка.

Экспериментальная аппаратура и методики

Эксперименты были проведены на двух установках с различными генераторами. В установке № 1 к генератору ГИН-600 [9,10] подключался вакуумный диод. Генератор ГИН-600 формировал импульс напряжения с максимальной амплитудой ~ 350 keV. Длительность импульса тока электронного пучка на полувысоте составляла $\tau \approx 12$ ns, диапазон варьируемой плотности энергии (0.1–0.4) J/cm². Использовались два метода регистрации спектров свечения кристаллов Ga₂O₃: „спектр по точкам“ и „спектр за импульс“.

Первый метод позволял регистрировать спектры свечения с помощью импульсного спектрометра на основе дифракционного монохроматора МДР-23 (решетка 1200 lines/mm, обратная линейная дисперсия 1.3 nm/mm), ФЭУ-97 (рабочий диапазон длин волн 250–650 nm, длительность переходной характеристики ~ 7 ns) и осциллографа Tektronix DPO 3034 (300 MHz),

связанного с компьютером. Временное разрешение спектрометра составляло ≈ 15 ns. Во втором методе суммарные за импульс возбуждения спектры свечения (без временного разрешения) регистрировались с помощью оптоволоконного спектрометра AvaSpec-3648 (диапазон 200–1100 nm, спектральное разрешение ~ 3 nm).

На установке № 2 применялся генератор РАДАН-220 [11], к которому подключался газовый диод. За счет изменения давления и сорта газа в диоде можно было изменять параметры тока сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП) [12]. На этой установке использовались два режима. В первом режиме плотность тока пучка составляла $j \approx 75$ A/cm² при длительности импульса на полувысоте $t \approx 180$ ps и частоте импульсов $f = 1$ Hz. Плотность энергии электронного пучка при этом достигала ~ 0.01 J/cm². Во втором режиме $j \approx 1.1$ A/cm², $t \approx 100$ ps, $f = 1$ Hz.

Спектры излучения Ga₂O₃ на установке № 2 в первом режиме измерялись с помощью спектрометра OceanOptics HR2000 + ES (диапазон 190–1100 nm, разрешение ~ 0.9 nm). Также в этом режиме, как и в работах [4,5,13], амплитудно-временные характеристики излучения в области 225–700 nm исследовались с высоким временным разрешением. Для этого применялся фотодиод PD025. Амплитудно-временные характеристики излучения на различных длинах волн во втором режиме определялись с помощью монохроматора МДР-23 и ФЭУ Н7732-10.

Сигналы с фотодиода PD025 и коллектора электронов регистрировались с помощью цифрового осциллографа Agilent DSO-X6004A (6 GHz, 20 выборок за наносекунду), а сигналы с ФЭУ — с помощью цифрового осциллографа Tektronix TDS3054B (0.5 GHz, 5 выборок за наносекунду).

Как и в работе [4], характеристики монокристаллических пластин β -Ga₂O₃, выращенных методом Степанова (EFG-метод, производитель — Tamura Corp. [2]), исследовались при температуре 300 К. Использовались пластины, легированные Fe и Sn. Более подробно характеристики этих пластин, а также экспериментальная аппаратура описаны в работе [4].

Результаты измерений и обсуждение

Спектры излучения кристаллов Ga₂O₃, легированных Fe и Sn, полученные при возбуждении однократным импульсом электронов с длительностью тока на полувысоте $\tau \approx 12$ ns и измеренные без временного разрешения с помощью оптоволоконного спектрометра AvaSpec-3648, приведены на рис. 1.

Сравнение спектров (рис. 1) со спектрами излучения кристаллов Ga₂O₃, измеренными в работе [4], свидетельствует об их идентичности. Однако ИВЧ при

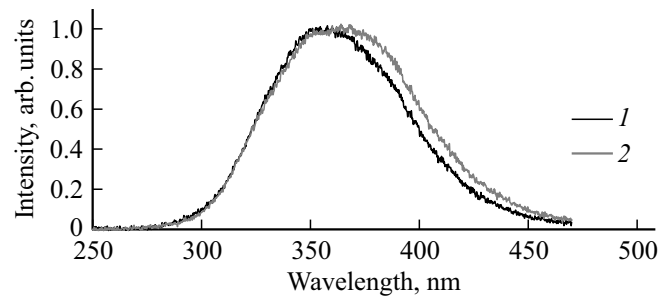


Рис. 1. Спектры излучения кристаллов Ga₂O₃, легированных Fe (1) и Sn (2), при возбуждении пучком электронов на установке № 1.

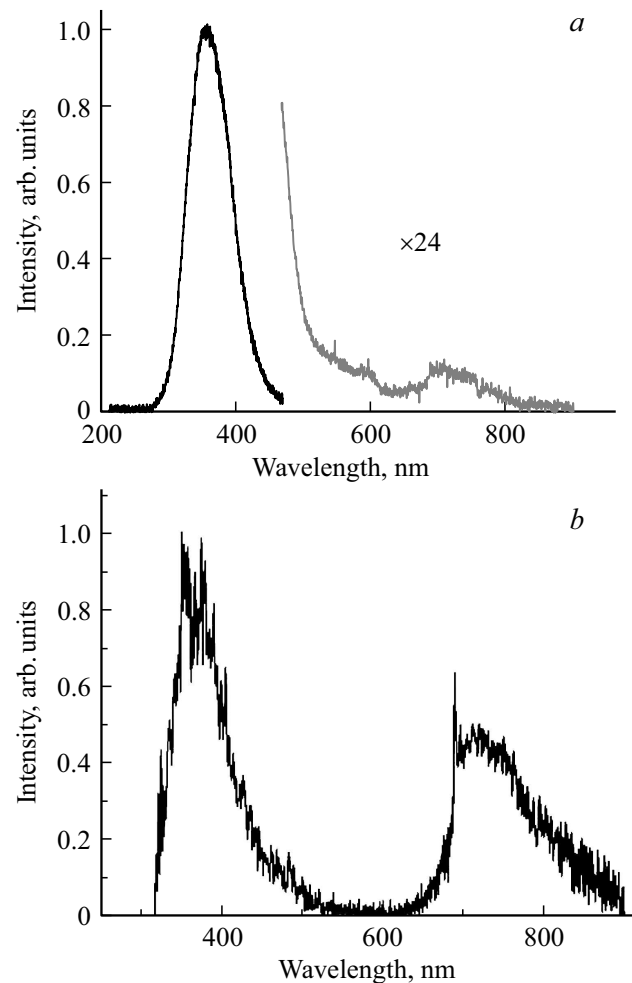


Рис. 2. Спектры излучения кристалла, легированного Fe, при облучении на установке № 1 (а), а также на установке № 2 (б) в первом режиме.

возбуждении Ga₂O₃ электронным пучком с длительностью импульса $\tau \approx 12$ ns из-за малой интенсивности не регистрировалось.

Увеличение длительности импульса тока пучка привело к существенному уменьшению интенсивности полосы излучения в области 650–900 nm, которая регистриру-

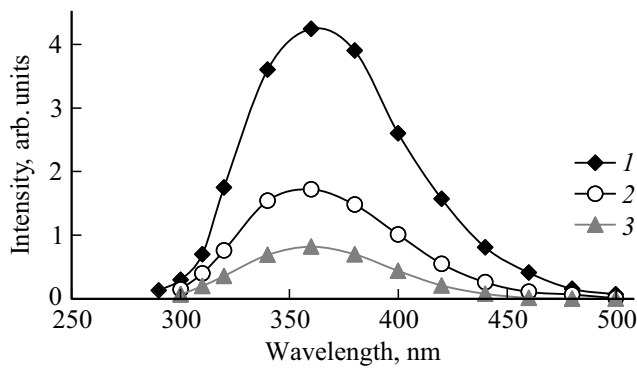


Рис. 3. Спектры излучения кристалла Ga₂O₃, легированного Sn, при возбуждении пучком электронов на установке № 1, измеренные с различной задержкой после импульса возбуждения: $t = 0$ (1), 40 (2) и 120 ns (3).

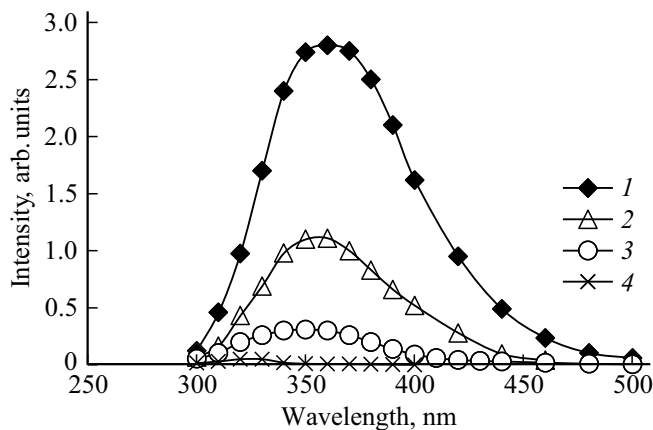


Рис. 4. Спектры излучения кристалла Ga₂O₃, легированного Fe при возбуждении пучком электронов на установке № 1 и измеренные с различной задержкой после импульса возбуждения: $t = 0$ (1), 20 (2), 40 (3) и 120 ns (4).

ется в кристалле, легированном Fe, при возбуждении пучком электронов субнаносекундной длительности. На рис. 2 приведены спектры излучения кристалла, легированного Fe, при облучении на установке № 1 при увеличении чувствительности спектрометра в длинноволновой области спектра, а также спектр, полученный на установке № 2 в первом режиме.

Видно, что интенсивность полосы в области 650–900 nm при длительности возбуждающего импульса $\tau \approx 12$ ns существенно меньше интенсивности полосы 300–450 nm. Объяснить данное поведение катодolumинесценции можно влиянием уровня возбуждения на соотношение полос люминесценции примесной и собственной природы. Известно, что с ростом уровня возбуждения происходит насыщение интенсивности свечения полос с низкой концентрацией примесных центров свечения.

На рис. 3, 4 показаны спектры излучения кристаллов, легированных Sn и Fe, в области 300–450 nm в раз-

личные моменты времени после импульса возбуждения, измеренные по методике „спектр по точкам“.

Видно, что форма этой полосы излучения в кристалле, легированном Sn, сохраняется при регистрации через 40 и 120 ns, полуширина полосы на полувывоте составляет $\text{FWHM} \approx 0.7$ eV, а ее интенсивность за 100 ns уменьшилась примерно в 4 раза. В кристалле, легированном Fe, спектр изменяется во времени. Максимум ИКЛ сдвигается в УФ область спектра и стабилизируется при $\lambda = 315$ nm (рис. 5). При этом полуширина полосы составляет $\text{FWHM} \approx 0.44$ eV.

Таким образом, в кристалле, легированном Fe, в спектре ИКЛ с длительностью импульса возбуждения $\tau \approx 12$ ns регистрируется две полосы люминесценции: коротковременная с длительностью импульса по основанию $t \sim 80$ ns ($\lambda_m = 360$ nm) и длинновременная с длительностью импульса $t \sim 220$ ns ($\lambda_m = 315$ nm).

На рис. 6 приведена кинетика ИКЛ кристалла Ga₂O₃, легированного Sn, на длине волны 360 nm, полученная на установке № 1 (а), и кинетика этого же кристалла, полученная на установке № 2 в режиме 1 (b) с высоким временным разрешением в области 360 nm.

Видно, что при высоком временном разрешении длительность фронта импульса излучения составила ≈ 1 ns, что на порядок больше, чем длительность импульса тока пучка во втором режиме на установке № 2. Кинетические характеристики полосы свечения $\lambda_m = 360$ nm, полученные при возбуждении кристалла Ga₂O₃, легированного Sn, электронными пучками нано- и субнаносекундной длительности, подтверждают вывод о люминесцентной природе этой полосы.

При возбуждении кристаллов Ga₂O₃ пучком электронов на установке № 1 ни с помощью монохроматора и ФЭУ, ни с помощью спектрометра ИВЧ в коротковолновой области спектра не было зарегистрировано. Также ИВЧ не было зарегистрировано с помощью спектрометра на установке № 2.

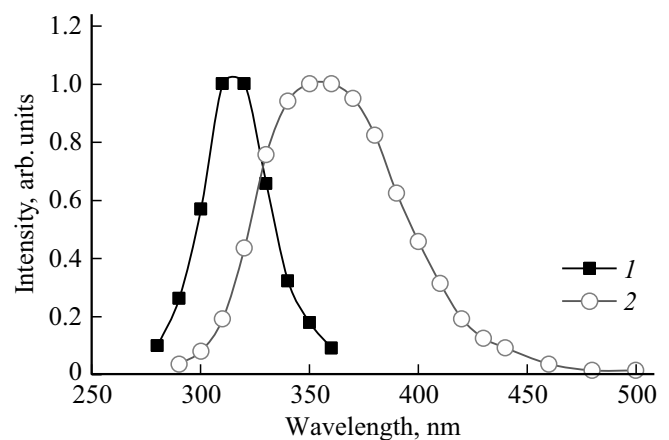


Рис. 5. Спектры излучения кристалла Ga₂O₃, легированного Fe (1) и Sn (2), при возбуждении пучком электронов на установке № 1, измеренные с различной задержкой после импульса возбуждения: $t = 100$ (1) и 300 ns (2).

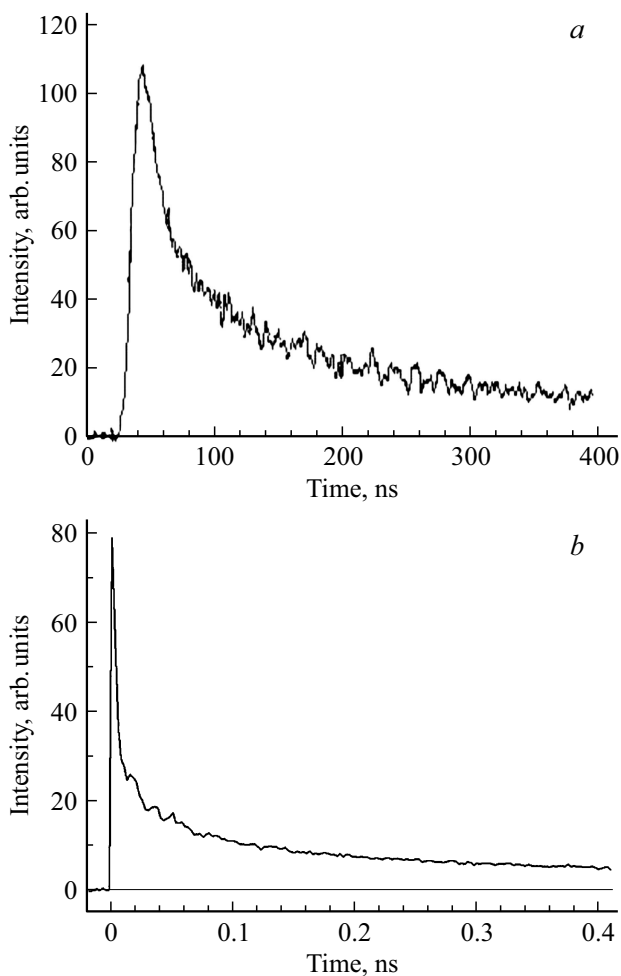


Рис. 6. Кинетика ИКЛ кристалла Ga_2O_3 , легированного Sn ($\lambda = 360 \text{ nm}$, на установке № 1 (a) и на установке № 2 в режиме 1 (b).

Однако при использовании монохроматора и ФЭУ Н7732-10 с высокой чувствительностью (до 10^7) ИВЧ в области 250–300 nm, как и в работах [4,5], на установке № 2 удалось зарегистрировать. Причем это удалось сделать не только в первом режиме при плотности тока пучка 75 A/cm^2 , но во втором режиме при плотности тока пучка 1.1 A/cm^2 . ИВЧ имело малую задержку относительно импульса тока пучка и длительность импульса свечения, которые не разрешались используемым ФЭУ.

Выводы

Проведенные исследования показали, что на спектры свечения кристаллов Ga_2O_3 существенное влияние оказывает длительность импульса пучка электронов. Наибольшую интенсивность катодолуминесценции при возбуждении кристаллов, легированных как Sn, так и Fe, пучком электронов с длительностью импульса $\tau \approx 12 \text{ ns}$ имеет полоса в области 300–450 nm.

В кристалле, легированном Sn, положение максимума ($\lambda_m = 360 \text{ nm}$) и полуширина полосы на полувысоте ($\text{FWHM} \approx 0.7 \text{ eV}$) существенно не изменяются в послесвечении.

В кристалле, легированном Fe, обнаружена новая полоса люминесценции с максимумом при $\lambda_m = 315 \text{ nm}$ и полушириной ($\text{FWHM} \approx 0.44 \text{ eV}$), которая является преимущественной в спектре ИКЛ при измерении через $t \geq 100 \text{ ns}$ после импульса возбуждения.

Увеличение длительности импульса тока пучка до 12 ns приводит к изменению соотношения полос ИКЛ в кристалле, легированном Fe, интенсивность полосы катодолуминесценции в области 650–900 nm оказывается существенно меньшей по сравнению с полосой в области 300–450 nm. Тогда как при возбуждении субнаносекундным электронным пучком интенсивность полосы в области 650–900 nm больше, чем в области 300–450 nm.

При создании датчиков электронов на основе свечения кристаллов Ga_2O_3 необходимо учитывать зависимость спектральных и кинетических характеристик излучения от длительности импульсов тока пучка. ИВЧ в кристаллах Ga_2O_3 более легко регистрировать при возбуждении пучком электронов субнаносекундной длительности.

Авторы благодарят И.А. Прудаева за предоставление для исследований кристаллов Ga_2O_3 . Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 18-19-00184 и частично за счет гранта Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета, номер проекта ВИУ_ИФВТ_73/2017.

Список литературы

- [1] Onuma T., Fujioka S., Yamaguchi T., Higashiwaki M., Sasaki K., Masui T., Honda T. // *Appl. Phys. Lett.* 2013. V. 103. N 4. P. 041910. doi 10.1063/1.4816759
- [2] Galazka Z., Irmscher K., Uecker R., Bertram R., Pietsch M., Kwasniewski A., Naumann M., Schulz T., Schewski R., Klimm D., Bickermann M. // *J. Cryst. Growth.* 2014. V. 404. P. 184. doi 10.1016/j.jcrysgro.2014.07.021
- [3] Kuramata A., Koshi K., Watanabe S., Yamaoka Y., Masui T., Yamakoshi S. // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2016. V. 55. N 12. P. 1202A2. doi 10.7567/JJAP.55.1202A2
- [4] Burachenko A.G., Beloplotov D.V., Prudaev I.A., Sorokin D.A., Tarasenko V.F., Tolbanov O.P. // *Opt. Spectrosc.* 2017. V. 123. N 6. P. 867.
- [5] Sorokin D.A., Burachenko A.G., Beloplotov D.V., Tarasenko V.F., Baksh E.K., Lipatov E.I., Lomaev M.I. // *J. Appl. Phys.* 2017. V. 122. N 15. P. 154902.
- [6] Savrukhin P.V., Shestakov E.A. // *Nuclear Fusion.* 2015. V. 55. N 4. P. 043016.
- [7] Zhou R.J., Hu L.Q., Zhang Y., Zhong G.Q., Lin S.Y., EAST Team. // *Nuclear Fusion.* 2017. V. 57. N 11. P. 114002.
- [8] Rubel M., Brezinsek S., Coenen J.W., Huber A., Kirschner A., Kreter A., Sergienko G. // *Matter and Radiation at Extremes.* 2017. V. 2. N 3. P. 87.

- [9] *Kovalchuk B.M., Mesyats G.A., Semin B.M., Shpak V.G.* // Prib. Tekh. Eksp. 1981. N 4. P. 15.
- [10] *Oleshko V.I., Baksht E.Kh., Burachenko A.G., Tarasenko V.F.* // Technical Physics. 2017. V. 62. N 2. P. 299–304.
- [11] *Zagulov F.Ya., Kotov A.S., Shpak V.G., Yurike Ya.Ya., Yalandin M.I.* // Pribory i Tekhnika Experimenta. 1989. N 2. P. 146.
- [12] *Tarasenko V.F., Baksht E.Kh., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Sorokin D.A.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2010. V. 38. N 10. P. 2583.
- [13] *Baksht E.Kh., Burachenko A.G., Tarasenko V.F.* // Technical Physics Letters. 2010. V. 36. N 11. P. 1020.