

СПЕКТРОСКОПИЯ
КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 535.33+537.523+533.9.07

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КРИСТАЛЛОВ Ga_2O_3 ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ
ПУЧКОМ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ

© 2017 г. А. Г. Бураченко^{a,*}, Д. В. Белоплатов^a, И. А. Прудаев^b, Д. А. Сорокин^a,
В. Ф. Тарасенко^{a,b}, О. П. Толбанов^b

^a Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, 634055 Томск, Россия

^b Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050 Томск, Россия

* E-mail: bag@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 16.05.2017 г.

Исследованы спектры и амплитудно-временные характеристики излучения кристаллов Ga_2O_3 , легированных Sn и Fe, при возбуждении пучком убегающих электронов и эксилампой с длиной волны 222 нм. Показано, что основной вклад в свечение образцов в области 280–900 нм при возбуждении пучком дает катодолюминесценция. В кристалле, легированном Fe, зарегистрирована новая полоса катодолюминесценции и фотолюминесценции в диапазоне длин волн 650–850 нм. В области 280–300 нм с помощью монохроматора и ФЭУ в кристалле, легированном Sn, зарегистрировано излучение Вавилова–Черенкова.

DOI: 10.7868/S0030403417110046

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы на установках типа ТОКАМАК начали проводить исследования датчиков, использующих свечение алмазных кристаллов для регистрации убегающих электронов [1–3]. Убегающие электроны, возникающие при нагреве плазмы, воздействуют на стенки вакуумной камеры и приводят к появлению вредных примесей, которые затрудняют получение управляемой термоядерной реакции. В работах [4, 5] для контроля времени появления убегающих электронов и их параметров использовалось излучение Вавилова–Черенкова (ИВЧ). ИВЧ возникало в алмазе при воздействии быстрых электронов с энергией 50 кэВ и более. Далее излучение по кварцевым световодам передавалось за пределы рабочей камеры и регистрировалось с помощью ФЭУ. Кроме алмаза в качестве датчиков убегающих электронов пытаются использовать и другие кристаллы [6].

В 2006–2008 гг. появились сообщения о синтезе монокристаллов $\beta-Ga_2O_3$ [7]. Позднее за счет улучшения технологии были созданы прозрачные кристаллы с коротковолновой границей пропускания до ~250 нм с пониженной концентрацией структурных дефектов [8, 9]. Начаты исследования люминесценции и других свойств кристаллов $\beta-Ga_2O_3$, легированных различными примесями, под воздействием УФ излучения [8–10]. Оксид

галлия (Ga_2O_3) относится к классу широкозонных соединений и обладает рядом уникальных свойств, позволяющих использовать его для изготовления высокотемпературных, силовых и радиационно-стойких приборов. Известно несколько различных фаз Ga_2O_3 , при этом наибольший практический интерес представляет β -фаза (моноклинная кристаллическая решетка) в силу ее высокой химической стабильности [11]. На ее основе изготавливаются прозрачные проводящие и диэлектрические покрытия, газовые сенсоры, люминофоры и фотоприемники [12–15]. Большая ширина запрещенной зоны $\beta-Ga_2O_3$ ($E_g = 4.8–4.9$ эВ) делает его перспективным для использования в оптоэлектронных устройствах в диапазоне коротких длин волн. Однако в литературе отсутствуют данные о свечении кристаллов Ga_2O_3 под воздействием пучка электронов.

Цель данной работы – получение данных о спектральных и амплитудно-временных характеристиках излучения кристаллов Ga_2O_3 , легированных Sn и Fe, при возбуждении пучком убегающих электронов, а также излучением эксилампы с длиной волны 222 нм. Настоящая работа была проведена с целью определения пригодности кристаллов Ga_2O_3 для регистрации ИВЧ при создании датчиков убегающих электронов для установок типа ТОКАМАК.

Таблица

Тип пластины	Кристаллографическая ориентация	Толщина, мкм	Тип проводимости	Легирующая примесь	Концентрация свободных носителей заряда, см ⁻³
№ 1	(010)	610	Полуизолятор	Fe	<10 ⁶
№ 2	(-201)	650	Полупроводник <i>n</i> -типа	Sn	3 × 10 ¹⁷

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АППАРАТУРА И МЕТОДИКИ

Эксперименты были проведены на двух установках с различными генераторами и газовыми диодами, что позволяло изменять в широких пределах параметры пучка электронов. В установке № 1 использовался генератор ГИН-55-1 [16]. Плотность тока пучка убегающих электронов за анодной фольгой (сверхкороткого лавинного электронного пучка – СЛЭП) составляла $j \approx 1.6$ А/см², длительность импульса СЛЭП на полувысоте $\tau \approx 100$ пс, частота следования импульсов $f = 60$ Гц. Распределение электронов по энергиям, определенное методом фольг по методике, которая подробно описана в [17], имело максимум при энергии электронов 50 кэВ, а максимальная энергия электронов составляла 100 кэВ. В установке № 2 использовался генератор РАДАН-220 [18] и применялись два режима возбуждения. В режиме 1: $j \approx 75$ А/см², $\tau \approx 180$ пс, $f = 1$ Гц; в режиме 2: $j \approx 1.1$ А/см², $\tau \approx 100$ пс, $f = 1$ Гц. Распределение электронов по энергиям для обоих режимов было подобно и имело два максимума при энергиях 70 и 150 кэВ, а максимальная энергия электронов составляла ~200 кэВ. Конструкция газового диода на подобной установке подробно описана в работе [19].

Кроме того, возбуждение кристаллов Ga₂O₃ осуществлялось УФ излучением от KrCl-эксилампы на длине волны 222 нм [20].

Спектры излучения, а также спектры пропускания на установках № 1 и № 2 измерялись с помощью спектрометра OceanOptics HR2000+ES (диапазон 190–1100 нм, разрешение ~0.9 нм) с известной спектральной чувствительностью. Амплитудно-временные характеристики излучения в диапазоне 225–700 нм исследовались с высоким временным разрешением с помощью фотодиода PD025 компании Photek (длительность переходной характеристики ~80 пс). Коротковолновая граница регистрируемого излучения определялась поглощением Ga₂O₃, а длинноволновая – уменьшением чувствительности фотодиода. Исследование амплитудно-временных характеристик излучения на различных длинах волн осуществлялось на установке № 2 в режиме 2 с помощью монохроматора МДР-23 (решетка –

1200 штрихов/мм, величина обратной линейной дисперсии – 13 Å/мм, ширина входной и выходной щелей монохроматора – 400 мкм) и ФЭУ Н7732-10 Hamamatsu (рабочий диапазон длин волн – 185–900 нм, диапазон изменения чувствительности ФЭУ – 10³–10⁷, длительность переходной характеристики – 2.2 нс) с известной спектральной чувствительностью. Сигналы с фотодиода PD025 и коллектора электронов регистрировались с помощью цифрового осциллографа Agilent DSO-X6004A (6 ГГц, 20 выборок за 1 нс), а сигналы с ФЭУ – с помощью цифрового осциллографа Tektronix TDS3054B (0.5 ГГц, 5 выборок за 1 нс). В режиме 2 излучение регистрировалось с помощью монохроматора и ФЭУ.

В работе исследовались характеристики монокристаллических пластин β-Ga₂O₃, выращенных методом Степанова (метод EFG, производитель – Tamura Corp. [9]). Исследовались два типа пластин (№ 1 и № 2, см. таблицу) при температуре 300 К.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Спектры излучения кристаллов Ga₂O₃ при возбуждении пучками электронов различной плотности и длительности на установках № 1 и № 2 (в режиме 1) и эксилампой приведены на рис. 1 и 2. Там же приведены спектры пропускания для этих пластинок.

Спектры свечения кристаллов Ga₂O₃, возбуждаемых пучком электронов и УФ излучением, существенно зависят от вида легирования. Наибольшую интенсивность при возбуждении пучком электронов имеет полоса катодолюминесценции в области 300–450 нм. Данная полоса также регистрируется при возбуждении УФ излучением от KrCl-эксилампы кристалла, легированного Sn. В кристалле, легированном Fe, при обоих способах возбуждения появляется вторая полоса в области 650–900 нм. Однако в этом кристалле фотолюминесценция в области 300–450 нм была слабой и не регистрировалась на фоне шумов. Отметим, что в этом кристалле интенсивность полосы в области 300–450 нм была существенно меньше, чем в кристалле, легированном Sn. Это

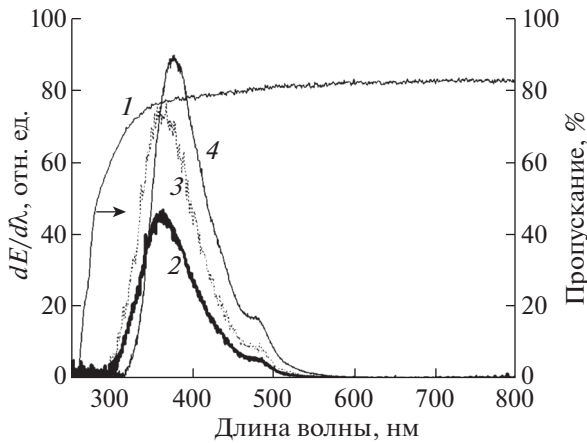


Рис. 1. Спектры пропускания (1) и излучения Ga₂O₃, легированного Sn, при возбуждении СЛЭП на установке № 1 (2) и № 2 в режиме 1 (3), а также при возбуждении эксилампой (4).

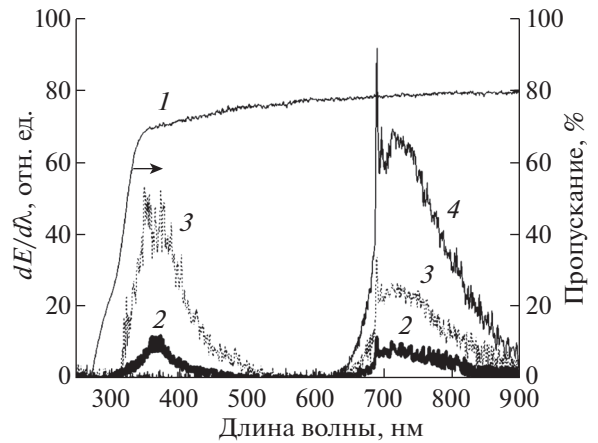


Рис. 2. Спектры пропускания (1) и излучения Ga₂O₃, легированного Fe, при возбуждении СЛЭП на установке № 1 (2) и № 2 в режиме 1 (3), а также при возбуждении эксилампой (4).

может быть обусловлено тем, что концентрация свободных носителей заряда с легирующей примесью Fe была существенно меньше, чем с Sn. С помощью спектрометра на установках № 1 и № 2 ИВЧ не было зарегистрировано.

ИВЧ в области 250–300 нм удалось зарегистрировать только при использовании монохроматора и чувствительного ФЭУ на установке № 2. Причем это удалось сделать не только в режиме 1 при плотности тока пучка 75 А/см², но и в режиме 2 при плотности тока пучка 1.1 А/см². На рис. 3а приведены импульсы излучения, зарегистрированные с помощью ФЭУ на длинах волн 265, 370 и 484 нм.

Излучение на длине волны 265 нм имеет минимальную задержку относительно импульса на-

пряжения и длительность, обусловленную временным разрешением используемого ФЭУ. Вторым пиком на осциллограммах излучения 1 и 2 связан с влиянием электромагнитной наводки на ФЭУ. При регистрации излучения в области катодолюминесценции амплитуда импульсов излучения и длительность импульсов с ФЭУ возрастала, что соответствует спектрам излучения на рис. 1 и 2. Таким образом, кристаллы Ga₂O₃ можно использовать для регистрации убегающих электронов с энергией более 82 кэВ (пороговая энергия для возникновения ИВЧ в Ga₂O₃), используя ИВЧ. Однако существенно большей чувствительностью к возбуждению пучками электронов обладает импульсная катодолюминесценция, особенно в кристаллах, легированных Sn.

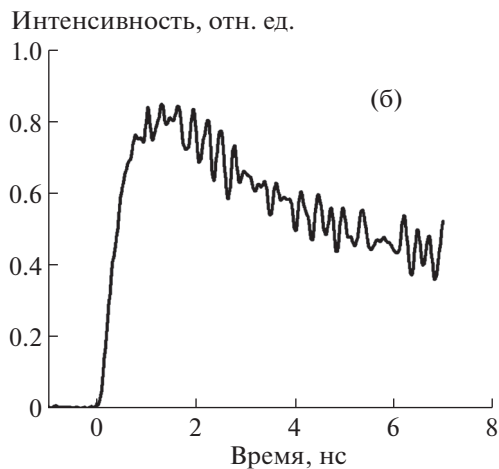
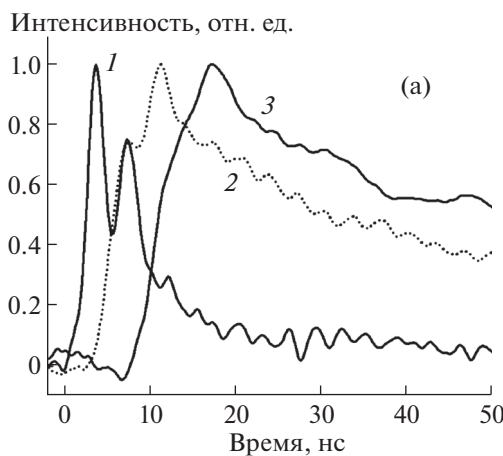


Рис. 3. Импульсы излучения на отдельных длинах волн с ФЭУ, установленного за монохроматором, полученные на установке № 2 в режиме 2 (а) (кривые 1, 2, 3 соответствуют длинам волн 265, 370 и 484 нм) и с фотодиода в режиме 1 (б).

Причем катодолюминесценция наблюдается и при энергиях электронов, меньших 82 кэВ.

Применение для регистрации излучения фотодиода с высоким временным разрешением позволило зарегистрировать на установке № 2 (режим 1) интегральные импульсы излучения свечения в области 250–700 нм. Эта область с коротковолновой стороны была ограничена пропуском кристаллов Ga₂O₃, а с длинноволновой — чувствительностью фотодиода. Полученный импульс излучения для кристалла, легированного Sn, приведен на рис. 3б. Фронт импульса излучения составил около 0.7 нс, а длительность импульса около 10 нс на полувысоте. Оба этих параметра существенно превышали длительность фронта и длительность тока пучка на установке № 2 в режиме 1, соответственно 150 и 180 пс. Как известно, ИВЧ является безынерционным относительно импульса возбуждения, следовательно, эксперименты с фотодиодом подтверждают, что при регистрации сигналов в области 250–700 нм основной вклад в излучение дает катодолюминесценция. Эксперименты с использованием фотодиода также подтверждают, что интенсивность катодолюминесценции кристалла, легированного Sn, существенно больше, чем интенсивность катодолюминесценции кристалла, легированного Fe.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что спектры свечения кристаллов Ga₂O₃, возбуждаемых пучком электронов и УФ излучением, существенно зависят от используемого легирования. Наибольшую интенсивность при возбуждении пучком электронов имеет полоса катодолюминесценции в области 300–450 нм. Данная полоса также регистрируется при возбуждении УФ излучением. В кристалле, легированном Fe, при обоих способах возбуждения появляется вторая полоса в области 650–900 нм, интенсивность катодолюминесценции в области 300–450 нм уменьшалась. Фотодолюминесценция в этом кристалле в области 300–450 нм не регистрировалась. ИВЧ было основным в области 250–300 нм и могло быть зарегистрировано только при использовании монохроматора и чувствительного ФЭУ. Таким образом, кристаллы Ga₂O₃ можно использовать для регистрации убегающих электронов с энергией более 82 кэВ по ИВЧ. Однако существенно большей чувствительностью к возбуждению пучками электронов обладает импульсная катодолюминесценция. Причем катодолюминесценция наблюдается и при энергиях электронов, меньших 82 кэВ. Предлагается использовать полученные данные при создании и калибровке датчиков убегающих электронов для установок по исследованиям термоядерного синтеза.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН по теме № 13.1.3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ghanbari M.R., Ghoranneviss M., Elahi A.S., Mohammedi S., Arvin R. // *J. Fusion Energy*. 2016. V 35. № 2. P. 180. doi 10.1007/s10894-015-9992-6
2. Jiang Z.H., Wang X.H., Chen Z.Y., Huang D.W., Sun X.F., Xu T., Zhuang G. // *Nuclear Fusion*. 2016. V. 56. № 9. P. 092012. doi 10.1088/0029-5515/56/9/092012
3. Aleynikov P., Breizman B.N. // *Nuclear Fusion*. 2017. V. 57. № 4. P 046009. doi 10.1088/1741-4326/aa5895
4. Jakubowski L., Sadowski M.J., Zebrowski J., Rabinski M., Malinowski K., Mirowski R., Lotte Ph., Gunn J., Pascal J.-Y., Colledani G., Basiuk V., Goniche M., Lipa M. // *Rev. Scientific Instruments*. 2010. V. 81. № 1. P. 013504. doi 10.1063/1.3280221
5. Jakubowski L., Sadowski M.J., Zebrowski J., Rabinski M., Jakubowski M.J., Malinowski K., Mirowski R., Lotte Ph., Goniche M., Gunn J., Colledani G., Pascal J.-Y., Basiuk V. // *Rev. Scientific Instruments*. 2013. V. 84. № 1. P. 016107. doi 10.1063/1.4776190
6. Elbersson L.N., Ping Y., Shepherd R.L., Patel P.K., Mackinnon A.J., Hill III W.T. // *Rev. Scientific Instruments*. 2009. V. 80. № 2. P. 023302. doi 10.1063/1.3080555
7. Aida H., Nishiguchi K., Takeda H., Aota N., Sunakawa K., Yaguchi Y. // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2008. V. 47. № 11. R. P. 8506. doi 10.1143/JJAP.47.8506
8. 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
9. Kuramata A., Koshi K., Watanabe S., Yamaoka Y., Masui T., Yamakoshi S. // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2016. V. 55. № 12. P. 1202A2. doi 10.7567/JJAP.55.1202A2
10. Onuma T., Fujioka S., Yamaguchi T., Higashiwaki M., Sasaki K., Masui T., Honda T. // *Appl. Phys. Lett.* 2013. V. 103. № 4. P. 041910. doi 10.1063/1.4816759
11. Yoshioka S., Hayashi H., Kuwabara A., Oba F., Matsunaga K., Tanaka I. // *J. Phys.: Condensed Matter*. 2007. V. 19. № 34. P. 346211. doi 10.1088/0953-8984/19/34/346211
12. Suzuki R., Nakagomi S., Kokubun Y., Arai N., Ohira S. // *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 94. № 22. P. 222102. doi 10.1063/1.3147197
13. Bereznaya S.A., Zarubin A.N., Korotchenko Z.V., Prudaev I.A., Red'kin R.A., Sarkisov S.Y., Tolbanov O.P. // *Russ. Phys. J.* 2015. V. 58. № 8. P. 1181. doi 10.1007/s11182-015-0629-z
14. Sawada K., Nakamura T., Adachi S. // *J. Alloys and Compounds*. 2016. V. 678. P. 448. doi 10.1016/j.jallcom.2016.04.004
15. Liu Z., Yamazaki T., Shen Y., Kikuta T., Nakatani N., Li Y. // *Sensors and Actuators. B: Chemical*. 2008. V. 129. № 2. P. 666. doi 10.1016/j.snb.2007.09.055
16. Efanov V.M., Efanov M.V., Komashko A.V., Kriklenko A.V., Yariv P.M., Zazoulin S.V. *Ultra-Wideband, Short Pulse Electromagnetics 9*. N. Y.: Springer, 2010. 301 p. doi 10.1007/978-0-387-77845-7

17. *Kozyrev A.V., Kozhevnikov V.Yu., Vorobyev M.S., Baksht E.Kh., Burachenko A.G., Koval N.N., Tarasenko V.F.* // *Laser and Particle Beams*. 2015. V. 33. № 02. P. 183. doi 10.1017/S0263034615000324
18. *Zagulov F.Ya., Kotov A.S., Shpak V.G., Yurike Ya.Ya., Yalandin M.I.* // *Pribory i Tekhnika Experimenta*. 1989. № 2. P. 146.
19. *Tarasenko V.F., Baksht E.Kh., Burachenko A.G., Beloplotov D.V., Kozyrev A.V.* // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. V. 45. № 1. P. 76. doi 10.1109/TPS.2016.2637570
20. *Lomaev M.I., Sosnin E.A., Tarasenko V.F.* // *Chem. Engin. & Technology*. 2016. V. 39. № 1. P. 39. doi 10.1002/ceat.201500229