

КРАСНО-ОРАНЖЕВАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ НЕЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ ИОДИДА МЕДИ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 80—300 К**В. А. Никитенко^{*}, С. Г. Стоухин, С. М. Кокин**

УДК 535.37;548.0

Российский университет транспорта (МИИТ),
127994, Москва, ул. Образцова, 9, корп. 14, Россия; e-mail: nikitenko100@mail.ru

(Поступила 24 мая 2019)

В результате комплексных исследований проведено разделение спектра оранжевой и красной фотолюминесценции иодида меди на четыре компоненты с $\lambda_{\text{макс}} \approx 625\text{--}635$ (O_1), $635\text{--}655$ нм (O_2), $725\text{--}735$ (K_1) и $735\text{--}755$ нм (K_2), что объясняется возможной ассоциацией соответствующих центров свечения (ЦС) с донорно-акцепторными парами (ДАП), ответственными за краевую люминесценцию CuI. Разработана генерационно-рекомбинационная схема красно-оранжевой люминесценции, основанная на оже-взаимодействии ЦС и ДАП. Установлено, что роль ЦС красной люминесценции CuI выполняют собственные дефекты в виде междоузельной меди. Показаны способы управления люминесцентными характеристиками иодида меди путем отжига кристаллов (в парах иода, в вакууме), а также легированием литием или насыщением образцов медью в процессе электродиффузии.

Ключевые слова: иодид меди, люминесценция, возбуждение, кристалл, спектр.

The spectrum of orange and red photoluminescence of copper iodide was divided into four components with $\lambda_{\text{max}} \approx 625\text{--}635$ (O_1), $635\text{--}655$ nm (O_2), $725\text{--}735$ nm (K_1) and $735\text{--}755$ nm (K_2). Such division may be explained by the possible association of the corresponding glow centers (GC) with donor-acceptor pairs (DAP) responsible for CuI edge luminescence. The generation-recombination scheme of red-orange luminescence based on the Auger interaction between the GC and the DAP was developed. It was found that the role of GC for red luminescence of CuI perform their own defects in the form of interstitial copper. It was shown that luminescent characteristics of copper iodide may be controlled by the crystal annealing (in the vapor of iodine, in a vacuum), or by doping with lithium or by saturation of the samples with copper in the process of electrodiffusion.

Keywords: copper iodide, luminescence, excitation, crystal, spectrum.

Введение. Возможность получения высокой электронной проводимости в ZnO и дырочной в CuI в сочетании с широкой прямой запрещенной зоной (3.2—3.4 эВ в ZnO и 2.95—3.12 эВ в CuI при 300 и 4.2 К) и большой (~60 мэВ) энергией связи свободных экситонов позволяет считать оксид цинка [1—4] и иодид меди [5—11] особо перспективными материалами для создания полупроводниковых источников УФ и видимого излучения, в том числе лазерных [1—8, 10]. В частности, согласно [12], эти соединения максимально адаптированы для создания на их основе поляритонного лазера, работающего при комнатной температуре, и для применения в поляритонике в целом. Поэтому исследования оптических свойств ZnO и CuI стали предметом пристального внимания на протяжении последних десятилетий [2—5, 13—21], тем более что барьерные гетероструктуры $n\text{-ZnO}/p\text{-CuI}$ используются для изготовления детекторов ближнего УФ излучения [11, 22]. Особый интерес к иодиду меди [6—11, 22—24] в связи с его возможным широким применением не только в поляритонике, но и в прозрачной микро- и нанoeлектронике [22] при изготовлении солнечных элементов [9, 11, 22], быстродействующих сцинтилляторов [9], диодов [11, 22] и т. д. заставил вернуться к прямому изучению оптических явлений в CuI.

RED-ORANGE LUMINESCENCE OF UNDOPED COPPER IODIDE CRYSTALS IN THE TEMPERATURE RANGE 80—300 K

V. A. Nikitenko^{*}, S. M. Kokin, S. G. Stouyhin (Russian University of Transport (MIIT), 9 bldg 14, Obraztsova Str., Moscow, 127994, Russia; e-mail: nikitenko100@mail.ru)

Одним из незавершенных исследований в настоящее время является определение влияния отклонения от стехиометрии на люминесцентные свойства иодида меди и моделирование генерационно-рекомбинационных процессов, определяющих его красно-оранжевую люминесценцию (КрОЛ), наличие которой отрицательно влияет на развитие поляритонного излучения [6—9, 23]. К настоящему времени установлено, что КрОЛ в CuI состоит из двух полос с максимумами при 600—680 и 700—750 нм [13, 21, 23, 24]. Это излучение возбуждается межзонными переходами электронов и имеет собственные полосы в спектре возбуждения *A*, *B* и *B* с максимумами при 318—425, 430—435 и 480 нм [13]; в формировании спектров, возможно, участвуют вакансии иода (отжиг монокристаллов в парах иода тушит КрОЛ [24]). Однако экспериментальных данных недостаточно для того, чтобы уверенно обосновать предположения о природе соответствующих центров свечения (ЦС) и построить на их основе полную генерационно-рекомбинационную модель КрОЛ.

В настоящей работе проведены комплексные исследования, включающие в себя изучение спектров возбуждения КрОЛ и люминесценции в исходных специально не легированных монокристаллах CuI, а также термообработанных в парах иода и в вакууме, подвергнутых электродиффузии ионов меди, и в кристаллах, легированных в процессе роста литием. Впервые удалось зарегистрировать спектры возбуждения фототока и в общем плане представить генерационно-рекомбинационную схему КрОЛ.

Техника эксперимента. Объектом исследований служили монокристаллы CuI, полученные гидротермальным методом в Институте кристаллографии РАН [14, 20]. Фотолюминесценция наблюдалась при возбуждении образцов излучением азотного лазера ($\lambda = 337$ нм) с плотностью выходной мощности до 1 МВт/см², а также с использованием стандартных ламп ПРК-4 и КГМ-24-150. Техника основного эксперимента описана в [2, 5, 13]. Для исследований спектров возбуждения фототока образец помещался в вакуумированный криостат, охлаждаемый жидким азотом, и освещался через монохроматор МДР-3 модулированным излучением лампы КГМ-24-150. Фототок усиливался селективным микровольтметром В6-4 и через преобразователь напряжения В9-1 с блоком согласования сигнала подавался на регистратор. Для создания омического контакта использовалась In-Ga-эвтектика. Измерения проводились на образцах с темновым сопротивлением от 1 кОм до 10 МОм.

Результаты и их обсуждение. Анализ большого количества спектров фото- и катодолюминесценции исследуемых гидротермальных монокристаллов CuI при $T = 80$ К показывает, что КрОЛ в общей сложности включает в себя две оранжевые полосы с максимумами при $\lambda_{\text{макс}} \approx 625\text{—}635$ (O₁) и 635—655 нм (O₂), а также две красные с $\lambda_{\text{макс}} \approx 725\text{—}735$ нм (K₁) и 735—755 нм (K₂). Присутствие в спектре той или иной компоненты может зависеть от характера возбуждения, температуры образца и выбранного монокристалла (рис. 1).

Все выделенные полосы имеют полуширину 0.2—0.3 эВ. Сопоставление энергетического положения данных полос с шириной запрещенной зоны $E_g = 3.115$ эВ при $T = 80$ К [18] указывает на участие глубоких уровней в процессе излучательной рекомбинации носителей заряда. Поскольку CuI является монополярным полупроводником *p*-типа проводимости [11], есть основания предполагать, что, как и в ряде других соединений подобного рода, центрами свечения являются ионизованные доноры [25].

Возбуждение КрОЛ может идти через экситонные состояния (линии в диапазоне $\lambda = 400\text{—}410$ нм) и различные донорно-акцепторные пары (ДАП), отвечающие за краевую люминесценцию CuI [13]. В приведенных спектрах возбуждение через ДАП сопоставлено со статистически подобранными полосами *A*, *B* и *B* с $\lambda_{\text{макс}} = 418\text{—}425$, 435—445 и 480 нм соответственно. В зависимости от образца в этих полосах можно возбудить красную или оранжевую люминесценцию или обе компоненты одновременно (рис. 1). Соответствующие им полосы краевой люминесценции достаточно подробно проанализированы в [16, 19, 21]. Приведем некоторые параметры ДАП [19], используемые при дальнейшем анализе механизма КрОЛ: ДАП₁-полоса *A*₁ ($E_{A1} = 0.157$ эВ, $E_{D1} = 0.03$ эВ), ДАП₂-полоса *A*₂ ($E_{A2} = 0.167$ эВ, $E_{D1} = 0.03$ эВ); ориентировочно ДАП₃-полоса *B* ($E_{A3} = 0.3$ эВ, $E_{D1} = 0.03$ эВ) и ДАП₄-полоса *B* ($E_{A4} \approx 0.5$ эВ, $E_{D1} = 0.03$ эВ). Уникальность ситуации заключается в том, что при гелиевых температурах удается выделить многофононные излучательные переходы электронов не только обычного типа донор—акцептор, но и возбужденный донор—акцептор, а также свободная зона—акцептор [19]. Кроме того, акцепторы типа E_{A1} , E_{A2} идентифицированы в результате параллельной экситонной спектроскопии кристаллов с регистрацией аннигиляции экситонов, связанных на нейтральных акцепторных парах [17, 18], и при анализе двухдырочных сателлитов экситонных линий [16]

(при аннигиляции экситона, связанного с нейтральным акцептором, часть энергии идет на возбуждение дырки, находящейся на акцепторном уровне) и т. д. [15, 16, 21].

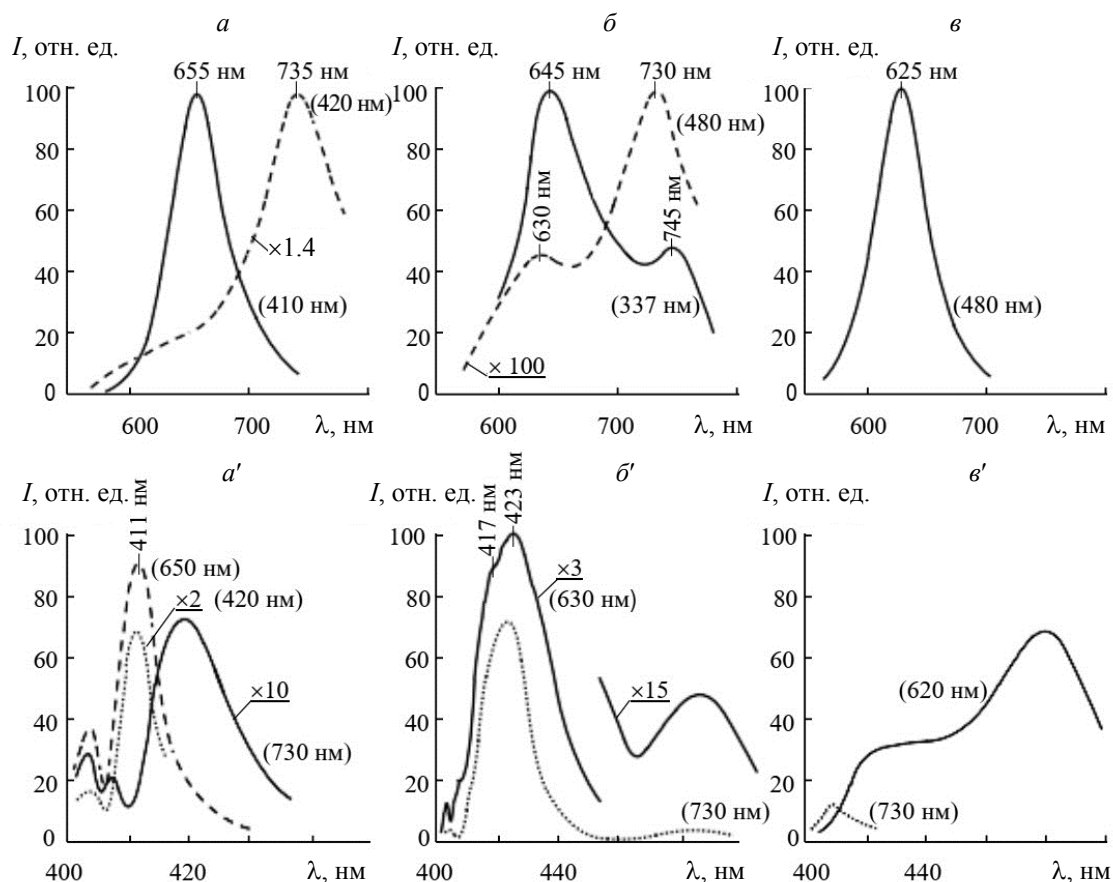


Рис. 1. Спектры красно-оранжевой люминесценции (a — $в$) и спектры возбуждения люминесценции (a' — $в'$) трех монокристаллов CuI; сплошные, штриховые линии и пунктир использованы для лучшего разделения спектров; в скобках — длина волны возбуждающего света (a — $в$) и возбуждаемого излучения (a' — $в'$); $T = 80$ К

Остановимся на вновь выявленных закономерностях КрОЛ, которые отмечены путем сопоставления большого количества спектров люминесценции различных партий специально не активированных гидротермальных монокристаллов. В некоторых из них наблюдается длинноволновое смещение максимума оранжевой полосы O_1 при увеличении интенсивности межзонного возбуждения излучением азотного лазера. С увеличением интенсивности возбуждения в 20—50 раз максимум полосы O_1 смещается до положения полосы O_2 . Наблюдается и аналогичное преобразование полосы K_1 в полосу K_2 . В спектрах возбуждения люминесценции образцов такого типа, как правило, имеются ярко выраженные полосы A , B , B . Их интенсивности могут изменяться от образца к образцу, возбуждение через указанные полосы приводит к появлению коротковолновых оранжевой или красной составляющих (O_1 , K_1) (рис. 1), интенсивности которых также изменяются от кристалла к кристаллу. Характерно, что при межзонном возбуждении красная полоса обычно крайне слаба по интенсивности. Кроме того, если при слабом межзонном возбуждении в спектре люминесценции доминируют полосы O_2 и K_2 (более длинноволновые составляющие), то какое-либо смещение при увеличении уровня возбуждения отсутствует. Энергия активации температурного тушения для полос O_1 и K_1 составляет 0.04—0.08 эВ, т. е. соответствует энергии активации температурного тушения полос ДАП в спектрах люминесценции [13, 21], полосы O_2 и K_2 обычно термически более стабильны. Эти закономерности, а также особенности спектров возбуждения люминесценции (рис. 1) объясняются в предположении, что в иодиде меди, обладающем p -типом проводимости, существуют два типа глубоких

доноров с энергией ионизации $E_{D2} = 1$ эВ (тип 2) и $E_{D3} = 1.35 \pm 0.05$ эВ (тип 3), а мелкий донор с $E_{D1} = 0.03$ эВ является компонентом ДАП [19]. Положение уровней доноров с E_{D2} и E_{D3} относительно валентной зоны из-за сильного электрон-фононного взаимодействия в полупроводниках с большой долей ионности связи приближенно рассчитано по высокоэнергетичному склону соответствующей полосы люминесценции на уровне ее полуширины (как и в ZnO [4], коэффициенты ионности ZnO и CuI 0.616 и 0.692 [26]). Предполагаемая схема энергетических переходов представлена на рис. 2.

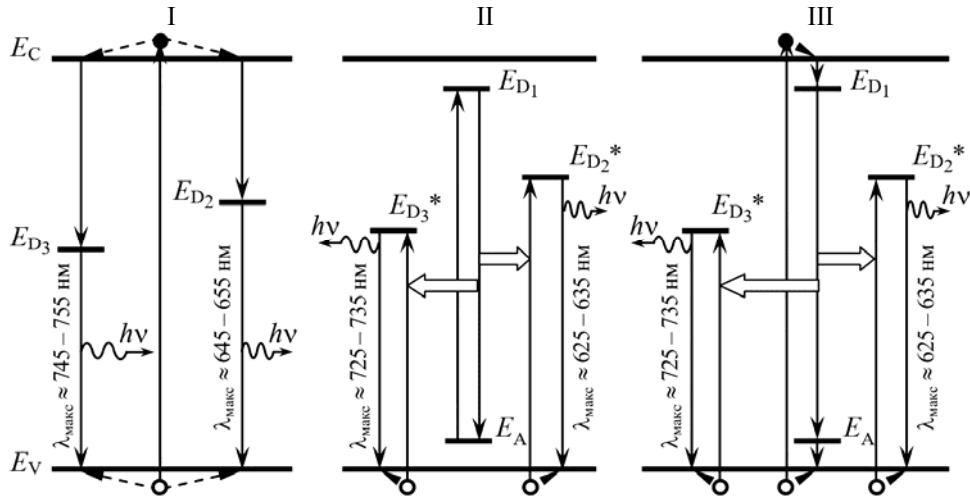


Рис. 2. Энергетическая диаграмма, поясняющая механизм КрОЛ и ее фотовозбуждения: I — межзонное возбуждение; II — образование КрОЛ с участием оже-процессов (излучение донорно-акцепторных пар (ДАП) формирует КрОЛ), происходящих при непосредственном возбуждении ДАП; III — образование КрОЛ с участием оже-процессов при межзонном возбуждении; * отмечены уровни энергий, смещенные из-за взаимодействия с ДАП

На наш взгляд, имеет место ассоциация ЦС, формирующих КрОЛ, с ДАП, задающими краевую люминесценцию иодида меди. Тогда полосу O_2 можно представить как следствие перехода электрона с донора типа 2 в валентную зону, а K_2 — как аналогичный излучательный переход в валентную зону с донора типа 3 (в данном случае отсутствует взаимодействие ЦС и ДАП). Как и во многих полупроводниках других видов, например ZnO и ZnS [4], возможная ассоциация ЦС с ДАП несколько уменьшает энергию ионизации доноров (влияние отрицательно заряженного акцептора ДАП), что приводит к появлению в КрОЛ полос O_1 и K_1 . Как показано в [13, 21], при $T \approx 90$ К наблюдается резкое тушение полос возбуждения A и далее B и B и соответствующих полос КрОЛ. Считаем, что такое поведение КрОЛ связано с наличием оже-взаимодействия между ДАП и ЦС (кванты излучения ДАП переводят электроны из валентной зоны на уровни ЦС, обратный переход возбужденных электронов в валентную зону формирует КрОЛ). В рамках этой модели длинноволновое смещение полос в спектрах КрОЛ некоторых образцов при увеличении межзонного возбуждения можно объяснить, если представить, что лишь часть ЦС ассоциирована с ДАП. С повышением уровня межзонного возбуждения увеличивается вероятность насыщения канала возбуждения через ДАП и большую роль начинает играть излучательная рекомбинация с участием изолированных ЦС, что объясняет формирование полос O_2 и K_2 , которые в отличие от полос O_1 и K_1 характеризуются термической стабильностью. Малая энергия активации температурного тушения полос O_1 и K_1 указывает на оже-механизм их возбуждения. Происходит усиленное тепловое заполнение электронами валентной зоны акцепторных состояний ДАП.

Рассмотренным A , B и B -полосам спектра возбуждения люминесценции при $T = 80$ К соответствуют аналогичные полосы в спектре возбуждения фототока (рис. 3, *a*), что также успешно объясняется предполагаемой на рис. 2 схемой оже-процесса. В спектрах возбуждения фототока регистрируется и образование экситонов, термический распад которых способствует появлению свободных носителей заряда и фототока. В отдельных образцах с сильным фиолетовым свечением и слабой КрОЛ в спектрах возбуждения фототока наблюдается ярко выраженный широкий максимум 600 нм, который не имеет аналога в спектре возбуждения люминесценции (рис. 3, *b*). Его появление, возможно,

связано с прямым переходом электронов из валентной зоны на ЦС КрОЛ. Тем не менее в спектре возбуждения люминесценции просматривается явное преимущество возбуждения КрОЛ через ДАП. Данное обстоятельство может быть обусловлено тем, что ЦС КрОЛ находятся вблизи середины запрещенной зоны, т. е. возможно последующее довозбуждение электронов в свободную зону, что, с одной стороны, не мешает появлению фототока, а с другой — уводит неравновесные носители заряда от ЦС. Кроме того, ассоциация ДАП и ЦС уменьшает вероятность развития побочных каналов излучательной и безызлучательной рекомбинации.

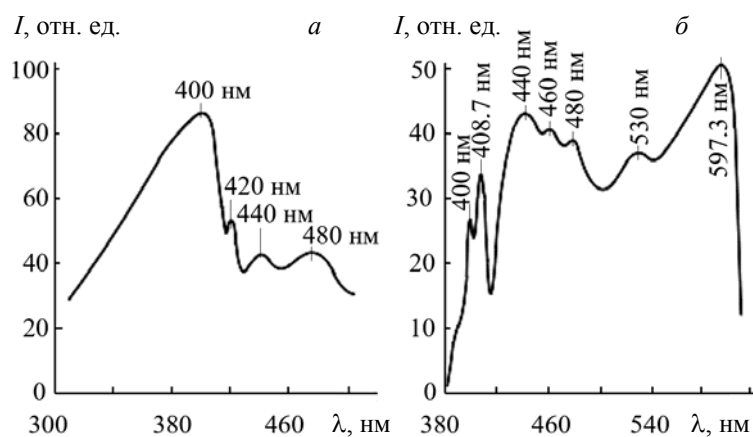


Рис. 3. Спектр возбуждения фототока в монокристаллах CuI первого (а) и второго типов (б); $T = 80$ К

Обсудим природу ЦС КрОЛ. Оказалось, что добавка LiOH в шихту при гидротермальном выращивании резко увеличивает красную люминесценцию, при этом удельное сопротивление кристаллов возрастает от $\rho \approx 10^3$ до $\approx 10^8$ Ом·см. Масс-спектрометрические исследования показывают, что концентрация Li в таких кристаллах 10^{17} — 10^{18} см $^{-3}$. Можно предположить, что это обусловлено замещением меди литием в решетке CuI и возникновением ЦС КрОЛ в виде ионов междоузельной меди. Это подтверждается и результатами экспериментов по электродиффузии меди в CuI (в данном материале ионы меди обладают высокой подвижностью [7]). Специально изготовленные плоскопараллельные образцы иодида меди (толщиной 1 мм и размером 3×3 мм) помещались в конденсаторную ячейку с медными электродами, в которой создавалось электрическое поле напряженностью $E \approx 60$ кВ/м. Воздействие длилось до 14 ч, затем ячейка разбиралась и после небольшого травления поверхности проводились измерения. Типичный спектр фотолюминесценции представлен на рис. 4, а. Обогащенная медью сторона кристаллов показывает усиление именно красной люминесценции, т. е. междоузельная медь является ее ЦС.

Интересные результаты получены при отжиге монокристаллов иодида меди в атмосфере иода. В кварцевую ампулу с кристаллом помещался кристаллический иод, ампула откачивалась форвакуумным насосом и отпаивалась. Отжиг осуществлялся при температуре ~ 300 °С в течение 12 ч. После отжига кристаллы меняют цвет на черный с фиолетовым отливом, на несколько порядков повышается их проводимость, резко меняется спектр люминесценции. Максимум люминесценции располагается в диапазоне 408—415 нм (рис. 4, б, кривые 1 и 2): КрОЛ практически пропадает (рис. 4, в, кривые 1 и 2) и кристаллы при низких температурах люминесцируют сине-фиолетовым цветом.

Проведен эксперимент по прогреванию термообработанных в парах иода кристаллов в ампуле с одновременной откачкой форвакуумным насосом при температуре +250 °С в течение 4 ч (температура прогрева не должна превышать 250—300 °С, так как при больших температурах возможно разрушение образца CuI). При прогреве кристаллы постепенно обесцвечиваются, из них выходит иод; исходный спектр люминесценции (в частности, КрОЛ) восстанавливается (рис. 4, в, кривая 3). Это подтверждает предположение, что центры КрОЛ связаны с междоузельной медью, которая в процессе отжига в иоде выходит на поверхность, а также “залечивает” точечные дефекты в виде вакансий меди. Возникающие при отжиге в парах иода акцепторные состояния, которые формируют фиолетовую люминесценцию в области 408—415 нм, могут быть обусловлены междоузельным иодом.

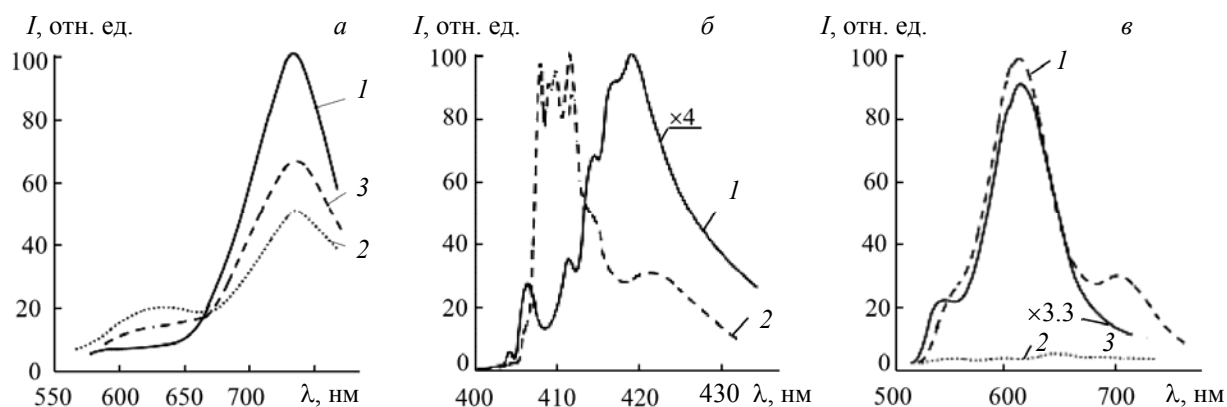


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции монокристалла CuI при $T = 80$ К и возбуждении излучением азотного лазера ЛГИ-21 ($\lambda = 337$ нм): *a* — до (3) и после приложения к нему разности потенциалов со стороны электрода отрицательной полярности (1), со стороны электрода положительной полярности (2); *б, в* — исходный кристалл (1), после отжига в парах иода (2), после отжига в ампуле с иодом и термообработки под откачкой ампулы форвакуумным насосом (3)

Роль акцепторов с $E_{A1} = 0.157$ эВ, $E_{A2} = 0.167$ эВ, $E_{A3} = 0.3$ эВ и $E_{A4} \approx 0.5$ эВ, формирующих краевую люминесценцию ДАП и полосы возбуждения *A*, *B* и *B*, могут выполнять вакансии меди и их ассоциаты различного вида. Предприняты попытки определить природу точечных дефектов в CuI методом фото-ЭПР (по методике [4] для ZnO), но они пока не увенчались успехом.

Закключение. Проведено разделение спектра оранжевой и красной люминесценции иодида меди на компоненты с $\lambda_{\text{макс}} \approx 625\text{—}635$ (O₁) и $635\text{—}655$ нм (O₂) и $\lambda_{\text{макс}} \approx 725\text{—}735$ нм (K₁) и $735\text{—}755$ нм (K₂). Коротковолновые полосы O₁ и K₁, обусловленные ассоциацией центров свечения с донорно-акцепторными парами, формирующими краевую люминесценцию CuI, имеют специфический спектр возбуждения; длинноволновые O₂ и K₂ вызваны рекомбинацией на изолированных центрах свечения. Разработана генерационно-рекомбинационная схема красно-оранжевой люминесценции, основанная на оже-взаимодействии центров свечения и донорно-акцепторных пар. Показано, что роль центров свечения красной люминесценции CuI выполняют собственные дефекты в виде междоузельной меди. Представлены спектры возбуждения фототока и способы управления люминесцентными характеристиками иодида меди путем отжига кристаллов в парах иода, вакууме, а также посредством легирования литием и насыщения образцов медью в результате электродиффузии.

Работа не могла бы состояться без параллельных исследований монокристаллов CuI при гелиевых температурах, за что выражаем искреннюю благодарность проф. Б. В. Новикову и сотрудникам кафедры физики твердого тела физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета.

- [1] Н. Моргос, Ü. Özgür. Zinc Oxide: Fundamentals, Materials and Device Technology, Wiley-VCH (2009)
- [2] Е. Н. Будилова, В. А. Никитенко, С. М. Кокин. Изв. РАН. Сер. физ., **79**, № 2 (2015) 181—185 [E. N. Budilova, V. A. Nikitenko, S. M. Kokin. Bull. Russ. Acad. Sci. Physics, **79**, N 2 (2015) 160—164]
- [3] И. П. Кузьмина, В. А. Никитенко. Окись цинка. Получение и оптические свойства, Москва, Наука (1984)
- [4] В. А. Никитенко. Журн. прикл. спектр., **57**, № 5-6 (1992) 367—385 [V. A. Nikitenko. J. Appl. Spectr., **57** (1992) 783—798]
- [5] В. А. Никитенко, С. Г. Стояхин, В. И. Пополитов, Ю. М. Мининзон. Опт. и спектр., **51** (1981) 7—10
- [6] А. Н. Грузинцев, В. Н. Загородцев. ФТП, **46**, № 2 (2012) 158—163
- [7] А. Н. Грузинцев, В. Н. Загородцев. ФТП, **46**, № 8 (2012) 999—1003
- [8] А. Н. Грузинцев, В. Н. Загородцев. ФТТ, **54**, № 1 (2012) 110—114

- [9] S. Yue, M. Gu, X. Liu, J. Zhag, S. Huang, B. Liu, C. Ni. *Opt. Mater.*, **66** (2017) 308—313
- [10] M. Wille, E. Kruger, S. Blaurock, V. Zviagin, R. Deichsel, G. Benndorf, L. Trefflich, V. Gottschalch, H. Krautscheid, R. Schmidt-Grund, M. Grundmann. *Appl. Phys. Lett.*, **111** (2017) 031105
- [11] M. Grundmann, F. L. Schein, M. Lorenz, T. Bontgen, J. Lenzner, H. Wenckstern. *Phys. Status Solidi A*, **210**, N 9 (2013) 1671—1703
- [12] M. Zamfirescu, A. Kavokin, B. Gil, G. Malpuech, M. Kaliteevski. *Phys. Rev. B*, **65**, N 16 (2002) 1205—1209
- [13] И. К. Верещагин, В. А. Никитенко, С. Г. Стоюхин. *Журн. прикл. спектр.*, **36**, № 5 (1982) 848—851
- [14] В. А. Никитенко, В. И. Пополитов, С. Г. Стоюхин, А. Я. Шапиро, А. Н. Лобачёв, А. И. Терещенко, В. Г. Колотилова. *Письма в ЖТФ*, **5**, № 19 (1979) 1177—1181
- [15] С. Г. Стоюхин, В. А. Никитенко, В. Г. Колотилова. *Опт. и спектр.*, **64** (1988) 943—944
- [16] И. К. Верещагин, В. А. Никитенко, С. Г. Стоюхин. *Опт. и спектр.*, **65** (1988) 207—210
- [17] I. K. Vereshchagin, V. A. Nikitenko, S. G. Stoyukhin. *J. Lumin.*, **29** (1984) 215—221
- [18] В. А. Никитенко, С. Г. Стоюхин. *Опт. и спектр.*, **54**, № 2 (1983) 193—196
- [19] В. А. Никитенко, С. Г. Стоюхин, М. В. Чукичев. *Журн. прикл. спектр.*, **49**, № 5 (1988) 779—784 [V. A. Nikitenko, S. G. Stoyukhin, M. V. Chukichev. *J. Appl. Spectr.*, **49** (1988) 1148—1152]
- [20] В. И. Пополитов, Ю. М. Мининзон, В. А. Никитенко, С. Г. Стоюхин. *Кристаллография*, **29**, № 34 (1984) 779—784
- [21] В. А. Никитенко, С. Г. Стоюхин, В. И. Пополитов, Ю. М. Мининзон. *Журн. прикл. спектр.*, **34**, № 4 (1981) 635—638 [V. A. Nikitenko, S. G. Stoyukhin, V. I. Popolitov, Yu. M. Mininzon. *J. Appl. Spectr.*, **34** (1981) 410—413]
- [22] Н. П. Ключко, В. Р. Копач, Г. С. Хрипунов, В. Е. Корсун, Н. Д. Волкова, В. Н. Любов, М. В. Кириченко, А. В. Копач, Д. О. Жадан, А. Н. Отченашко. *ФТП*, **51**, № 6 (2017) 821—829
- [23] F. Li, M. Gu, X. Liu, S. Yie, J. Zhu, Q. Li, Y. Hu, S. Huang, B. Liu, C. Ni. *J. Lumin.*, **205** (2019) 337—341
- [24] M. Xia, M. Gu, X. Liu, B. Liu, S. Huang, C. Ni. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **26** (2015) 2629—2638
- [25] М. В. Фок. *Тр. ФИАН*, **117** (1980) 80—121
- [26] J. C. Phillips. *Rev. Modern Phys.*, **12**, N 3 (1970) 317—356