

О повышении эффективности стримерного полупроводникового лазера

К.И.Русаков, В.В.Паращук

Исследовано влияние интенсивных электрического и оптического полей, создаваемых стримерным разрядом в широкозонных полупроводниках, на их спектроскопические свойства. Данный эффект проявляется в возникновении обратной перестройки люминесцентных характеристик активной среды. Предложены методы существенного повышения срока службы и эффективности стримерного лазера в условиях предельных режимов, основанные на использовании полупроводниковых защитных слоев определенной кристаллографической ориентации и кристаллического микрорельефа с размером элементов порядка длины волны света. Обнаружено и изучено стримерное свечение в новых перспективных соединениях CaGa_2S_4 :Eu, $\text{Ca}_4\text{Ga}_2\text{S}_7$:Eu.

Ключевые слова: широкозонные полупроводники, стримерные разряды, халькогениды редкоземельных элементов, слоистые кристаллы, фото- и стримерная люминесценция, стримерный лазер, предельные режимы, ресурс.

1. Введение

Исследование свойств стримерных разрядов в твердых телах, в том числе широкозонных полупроводниках, открывает новые возможности для изучения нелинейных оптических, электрических, акустических и некоторых других явлений в данных средах [1, 2]. Длительное время развитие исследований по физике и технике полупроводниковых стримерных лазеров (ПСЛ) тормозилось отсутствием однозначного понимания роли излучательных процессов в формировании стримера, в том числе сведений о воздействии на активную среду сильных оптических и электрических полей, сопровождающих разряд. Кроме того, практическое использование стримерных технологий сдерживалось рядом других причин, среди которых следует отметить деградацию приэлектродной области, существенную в случае предельных режимов работы и обуславливающую относительно невысокие ресурс и эффективность реальных ПСЛ. Остается актуальным также поиск новых активных сред в связи с необходимостью дальнейшего расширения спектрального диапазона излучения стримерных лазеров, выяснения особенностей разрядов в указанных средах и улучшения на этой основе характеристик лазера.

Цель настоящей работы – установление закономерностей воздействия стримерного разряда на активную среду в условиях интенсивного излучения и сильного электрического поля, разработка методов существенного повышения ресурса и мощности (эффективности) лазера в условиях предельных режимов, включая пакетно-импульсный [3], а также поиск новых перспективных активных сред.

В.В.Паращук. Институт физики им. Б.И.Степанова НАНБ, Белоруссия, 220072 Минск, просп. Независимости, 68;
e-mail: v_shchuka@rambler.ru
К.И.Русаков. Брестский государственный технический университет, Белоруссия, 224017 Брест, ул. Московская, 267;
e-mail: rusakov@bstu.by

Поступила в редакцию 29 июня 2006 г.

2. Разработка методов улучшения характеристик лазера в условиях предельных режимов эксплуатации

Повышение ресурса, стабильности и некоторых других базовых характеристик стримерного излучения является одной из проблем, которая до настоящего времени полностью не решена и требует учета взаимодействия разряда со средой, в том числе комплекса процессов, включающих воздействие сильных электрических и оптических полей, а также других интенсивных факторов, сопровождающих разряд.

Сравнение различных способов возбуждения показало, что максимальная интенсивность стримерного разряда, а следовательно, и эффективность накачки лазера достигаются при возбуждении через разрядный промежуток вблизи рабочей поверхности образца. Данный промежуток позволяет существенно обострять фронт прикладываемого импульса напряжения при минимальных энергетических потерях, что является одним из необходимых условий возникновения стримера. Методика возбуждения и исследования разрядов детально описана ранее в [1–3]. Длительность используемых импульсов напряжения составляла ~ 100 нс, эффективная частота следования достигала 10 МГц (пакетно-импульсный режим), амплитуда была равна 250 кВ. В рассматриваемом случае для увеличения срока службы излучающего элемента потребовалось применение специальных мер его защиты от непосредственного воздействия искрового разряда в диэлектрической среде. В качестве одной из таких мер нами было предложено использование предохраняющего (буферного) материала, препятствующего воздействию на рабочий кристалл сильного электрического поля и искрового разряда. Одновременно к буферному слою предъявлялось требование: он не должен препятствовать интенсивной генерации излучения стримеров.

Поиск материалов, пригодных для создания предохраняющего слоя, осуществлялся среди различных твердых тел – диэлектриков, полупроводников и металлов –

при различных условиях, среди которых важнейшими являются условия перехода (передачи энергии) разрядов между слоями. Как оказалось, наибольшей эффективностью в этом отношении характеризуется система на основе буферного слоя из одноименного полупроводника, представленная на рис.1. При этом наибольшая длина стримерных треков и интенсивность их свечения наблюдаются в такой геометрии перехода (оптимальные условия), когда пространственная ориентация стримеров в защитном (*a*) и рабочем (*b*) кристаллах практически одинакова. Это соответствует наименьшим потерям энергии при переходе и обеспечивает минимальные разрушения поверхности рабочего тела.

Данная система состоит из рабочего кристалла – пластинки CdS толщиной ~ 0.5 мм, ориентированной в плоскости типа $\{0001\}$, и защитного слоя из этого же кристалла толщиной ~ 1 мм, вырезанного в плоскости $\{1\bar{2}10\}$. В плоскости $\{0001\}$ (рабочий кристалл) проекции стримерных треков образуют шестилучевую звезду, что облегчает наблюдения, а в буферном слое разряды распространяются под некоторыми углами к нормали. Так как плоскости $(10\bar{1}0)$ кристаллов, в которых распространяются стримеры, параллельны, то этим достигается незначительное отклонение стримеров типа e_2 и e_3 в рабочем кристалле от первоначальных в защитном слое. В отличие от стримеров указанного типа переход e_1 затруднен из-за необходимости существенного изменения направления движения на $\sim 90^\circ$. Такой переход разрядов из одного кристалла в другой возможен вследствие близости углов ориентации стримеров к углу $\pm 45^\circ$ относительно оси *C*.

В описанной геометрии возбуждения одиночными импульсами с частотой следования до 50 Гц и амплитудой

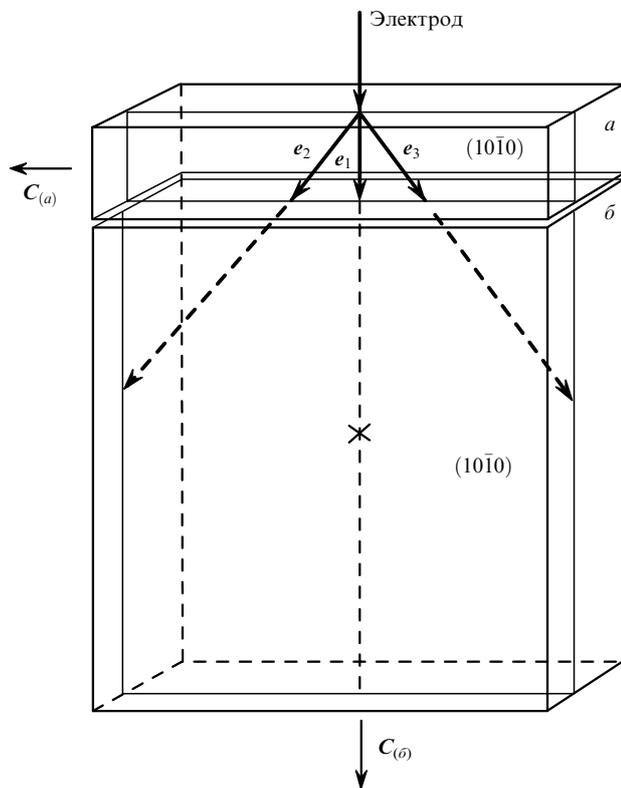


Рис.1. Схема возбуждения разрядов и взаимная ориентация защитного (буферного) (*a*) и рабочего (*b*) кристаллов CdS в импульсно-перриодическом режиме.

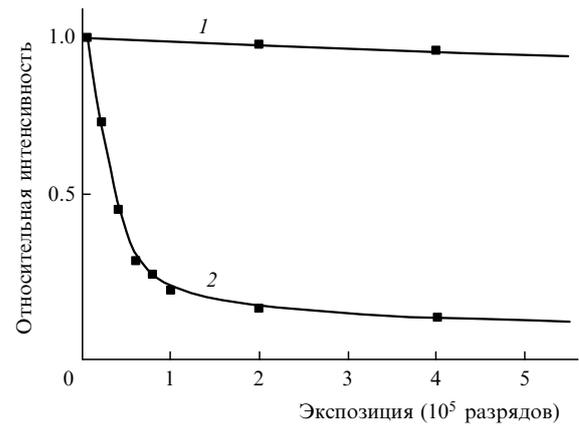


Рис.2. Относительная интенсивность свечения стримерных разрядов в зависимости от экспозиции при наличии (1) и в отсутствие (2) буферного слоя.

дой не более 50 кВ в рабочем кристалле на протяжении, как минимум, двух часов наблюдалась устойчивая картина стримерных треков без заметного снижения интенсивности свечения, что при прочих равных условиях на 1–2 порядка превышает литературные данные и соответствует экспозиции $N \sim 10^6$ импульсов. Влияние защитного слоя на интенсивность стримерного излучателя и его ресурс показано на рис.2.

Следует отметить, что в условиях предельных режимов в защитном материале возникают разрушения в виде глубокого, почти сквозного кратера, тогда как в рабочем кристалле глубина разрушений незначительна (практически на уровне их начальной стадии). С увеличением числа возбуждающих импульсов до $\sim 10^5$ размеры кратера возрастают, и для восстановления начальной энергии излучения необходимо сдвигать игольчатый электрод от исходного положения на расстояние 1.0–1.5 мм.

3. Исследование влияния кристаллического микрорельефа на эффективность излучателя при стримерном возбуждении

С целью повышения мощности и эффективности ПСЛ изучены условия перехода разрядов между кристаллами в случае, когда в качестве рабочего кристалла использовался образец в виде пластины толщиной не более 100 мкм, имеющий одну полированную поверхность с напыленным зеркальным покрытием или без него, а другую – травленную, элементы микрорельефа которой сравнимы с длиной волны света. Методика создания микроструктуры приведена в работе [4]. При этом поверхностью перехода стримеров служила поверхность микроструктуры, а буферным кристаллом – образец с двумя полированными поверхностями толщиной 1–2 мм, ориентированный указанным выше образом (рис.3). Резонатор лазера образован поверхностью микрорельефа и противоположной ей поверхностью рабочего кристалла. Опыты проводились также в отсутствие буферного кристалла.

На систему подавались пакеты импульсов с амплитудой до 200 кВ. Выяснилось, что в случае наличия микрорельефа на поверхности излучателя контакт между кристаллами хуже, чем между полированными поверхностями, что несколько затрудняет переход стримера. Однако указанный недостаток компенсируется значитель-

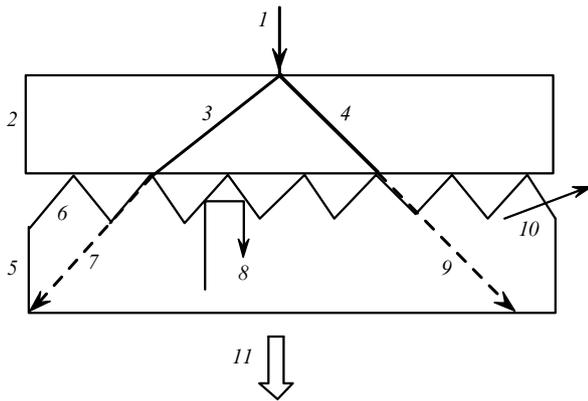


Рис.3. Схема возбуждения генерации света в лазерной системе при наличии микрорельефа:

1 – электрод; 2, 5 – буферный и рабочий кристаллы; 6 – микрорельеф; 3, 4 – разряды в защитном слое; 7, 9 – стримеры в рабочем кристалле; 8, 10 – отраженные и преломленные лучи на гранях элементов микрорельефа; 11 – генерируемый пучок света.

ным (в 2–3 раза) усилением стримерного свечения. Интенсивность излучателя дополнительно повышается в отсутствие буферного кристалла. О достижении режима генерации света в исследуемой системе свидетельствовало резкое сужение спектра (близкий к одномодовому режим) и возникновение характерной диаграммы направленности излучения с угловой расходимостью $\sim 30^\circ$, типичной для поперечной геометрии стримерного возбуждения в образцах с нанесенными зеркалами (без микрорельефа) [1].

На основании данных [4] можно полагать, что наличие микроструктуры на поверхности излучателя приводит к значительному увеличению потерь для неаксиальных мод и к повышению эффективности отражения (возврата) излучения (рис.3, лучи 8) в активную среду, вследствие чего возрастает КПД генерации. При этом положительную роль играет не только вывод (преломление) неаксиальных мод (лучи 10), но и рассеяние соответствующих лучей на гранях элементов микроструктуры. Увеличение мощности выходного излучения обусловлено также повышением степени однородности светового пучка в активной области из-за его рассеяния на рельефе. Разрушения, возникающие на естественных поверхностях фигур травления микрорельефа, прогрессируют медленнее, чем в случае гладкой поверхности. При этом возрастают лучевая прочность такого излучателя и его эффективность в целом. Механизм указанного явления детально исследован на примере полупроводникового лазера с оптической двухфотонной накачкой [4]. Результаты этих исследований были положены в основу разработки мощных электронно-пучковых полупроводниковых лазеров типа излучающего зеркала [5] и, как следует из вышесказанного, позволили увеличить мощность (эффективность) и ресурс стримерного лазера.

4. Взаимодействие стримерного разряда с активной средой лазера

В связи с комплексным воздействием стримерных разрядов представляло интерес выяснить их влияние на спектроскопические (люминесцентные) характеристики активной среды при различных условиях. Использовались образцы в виде плоскопараллельных пластин тол-

щиной 0.5–1.1 мм, ориентированных в плоскостях (10 $\bar{1}$ 0) так, чтобы полярная ось была направлена вдоль длинной стороны пластины. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) регистрировались с грани образца, через которую выходило излучение стримерных разрядов, возбуждаемых импульсами напряжения амплитудой ~ 50 кВ с частотой следования до 5 Гц. При этом влияние искры, воздействующей на противоположную грань кристалла, устранялось. Люминесценция возбуждалась излучением непрерывного гелий-кадмиевого лазера при комнатной температуре ($T \approx 300$ К) и температуре жидкого азота ($T \approx 80$ К).

Установлено, что, аналогично данным работы [6], в случае использования в качестве диэлектрической среды авиационного керосина при $T = 300$ К воздействие на кристалл $N \sim 5 \times 10^3$ разрядов приводит к снижению интенсивности ФЛ примерно в 2 раза по сравнению с начальной интенсивностью. Предпринимались меры по устранению непосредственного влияния излучения лазера. Дальнейшая экспозиция при $N \sim 5 \times 10^3$ разрядов также сопровождалась уменьшением интенсивности ФЛ. Затем с целью контроля поведения экситонных линий опыты были повторены при $T = 80$ К. Особенность поведения этих линий состоит в зависимости их интенсивности от экспозиции, в частности в постепенном ее увеличении примерно в 10 раз при $N = 1.5 \times 10^4$ и резком уменьшении после $N = 2.5 \times 10^4$. Данный эффект усиления-тушения ФЛ носит обратимый характер, т. к. воспроизводится после выдерживания кристалла в течение времени $\tau \sim 24$ ч при $T = 300$ К. Соответствующая перестройка спектра ФЛ с ростом экспозиции до 3×10^4 разрядов показана на рис.4.

Интенсивность «зеленой полосы» уменьшается приблизительно в два раза по сравнению со случаем $N = 2.5 \times 10^4$, полуширина ее увеличивается, а экситонные линии исчезают, что свидетельствует о сильном изменении состояния поверхности кристалла. Наблюдаемую трансформацию спектра с учетом данных [6] можно объяснить интенсивным разложением приповерхностного слоя с образованием безызлучательных дефектов и комплексов. Вследствие совместного действия сильного электрического поля и мощного излучения разрядов в припо-

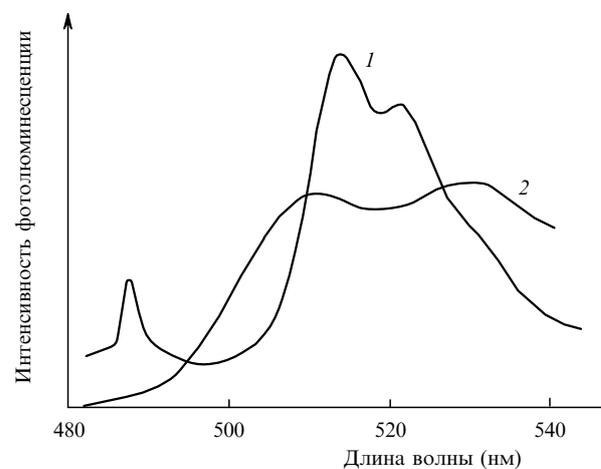


Рис.4. Спектры фотолюминесценции монокристаллов CdS в зоне действия стримерного разряда при экспозиции $N = 2.5 \times 10^4$ (1) и 3×10^4 (2); $T = 80$ К. Возбуждение осуществляется излучением непрерывного гелий-кадмиевого лазера ЛГН-409 ($\lambda = 325$ нм, $P = 3$ мВт).

верхностном слое, вероятно, происходит разрушение кристаллической решетки, начинающееся на различного рода дефектах, образованию которых способствуют механические деформации и остаточные напряжения. При этом оказавшиеся на поверхности решетки ионизованные (вследствие высоких уровней возбуждения) атомы исходных компонентов кристалла и примесей могут вступать в химические реакции с окружающей кристалл диэлектрической жидкостью и создавать различные комплексы, приводящие к изменению спектра ФЛ.

При использовании в качестве диэлектрической среды авиационного керосина воздействие искрового разряда и сильного электрического поля приводит к разложению больших органических молекул на мелкие части и к образованию различных ассоциатов с дефектами на поверхности кристаллической решетки. Известно, что разложение монокристаллов CdS не стимулируется гексаном, этилацетатом и этанолом [7]. Опыты по стримерной накачке в гексане и серном эфире указали на отсутствие перестройки спектра даже при $N = 3 \times 10^4$, что свидетельствует о меньшей интенсивности процессов разложения поверхности сульфида кадмия в этих жидкостях по сравнению с керосином в рассматриваемых условиях. Таким образом, выбор окружающей диэлектрической среды позволяет минимизировать влияние указанных факторов с целью улучшения характеристик стримерного лазера.

5. Поиск новых перспективных активных сред

Стримерное свечение получено и исследовано с участием авторов в ряде бинарных, тройных и более сложных соединений, как хорошо изученных, так и новых (см. [1] и обзор [2]). Это ZnS (длина волны излучения $\lambda \sim 345 - 355$ нм), ZnO (~ 400 нм), ZnSe (447–470 нм), ZnTe, CdSe и CdS_xSe_{1-x} (610–630 нм), GaAs (~ 830 нм), $AgGaS_2$ (~ 550 нм), $CuGaS_2$, $CuGaSe_2$ (820–960 нм), $CuGaS_{2x}Se_{2(1-x)}$ (700–960 нм). Общий итог этих исследований таков: стримерные разряды как быстропотекающее явление несут характер кооперативных самоорганизованных процессов [8], в которых оптическим явлениям отводится важнейшая роль. При этом результаты исследования эффективности полупроводникового лазера с использованием микрорельефа при оптической накачке [4] оказались полезными, как отмечалось выше, для увеличения эффективности и ресурса стримерного лазера.

Ниже остановимся на результатах изучения условий возбуждения, пространственных и оптических свойств разрядов еще в двух интересных средах – кристаллах $CaGa_2S_4$ и $Ca_4Ga_2S_7$, активированных ионами европия. Эти кристаллы являются представителями широкозонных соединений типа $A_m^{II}B_n^{III}C_n^{VI}$ ($m = n - 3, n = 4, 5, 6, \dots$) – монокристаллов орторомбической симметрии класса D_{2h}^{24} и кубической сингонии соответственно [9]. Соединения $CaGa_2S_4$ характеризуются слоистой кристаллической структурой при толщине слоевого пакета 30–100 мкм и являются модельным объектом для исследования закономерностей стримерных разрядов в квазидвумерных средах. Использование неразрушающих разрядов расширяет возможности изучения реальной структуры кристалла, его электрических и оптических свойств. Кроме того, активированные редкоземельными ионами кристаллы данного класса перспективны для создания высоко-

коэффициентных источников дневного света, экранов рентгеновских устройств, цветных дисплеев и других систем отображения информации.

Использовались монокристаллы размером $\sim 5 \times 3 \times 1$ мм с удельным сопротивлением $10^9 - 10^{10}$ Ом·см, выращенные диффузионным методом газотранспортной реакции и методом Бриджмена. Рабочая поверхность образцов получена путем скальвания, разряды возбуждались импульсами напряжения с амплитудой ~ 50 кВ и длительностью ~ 100 нс через разрядный промежуток в диэлектрической жидкости по стандартной методике и в пакетно-импульсном режиме. Определены оптимальные условия возникновения разрядов при комнатной температуре и температуре жидкого азота в зависимости от геометрии опыта, амплитуды и полярности возбуждающих импульсов. Наблюдались одиночные прямые разряды определенной кристаллографической ориентации; в случае $CaGa_2S_4$ стримеры локализованы в плоскости слоевого пакета и характеризуются выходом основной части светового потока вдоль канала и стабильными пространственно-временными характеристиками. Изменение температуры от 300 до 80 К приводит к заметному увеличению интенсивности разряда. Образование стабильных одиночных разрядов, снижение общего числа стримеров и их типов наблюдалось нами ранее в стержневидных и пластинчатых кристаллах сульфида кадмия [10], а также независимо другими авторами в щелочно-галогенидных кристаллах [11]. Данный факт интерпретируется в рамках представлений о взаимодействии электромагнитных волн микроволнового и видимого диапазонов, инициированных стримером [10], и о самоорганизованных процессах при разряде [8].

Легирование кристаллов $CaGa_2S_4$ ($Ca_4Ga_2S_7$) многозарядной глубокой примесью Eu приводит к резкому увеличению интенсивности стримерного излучения в желто-зеленой области спектра (рис.5), что обусловлено вкладом собственных и примесных каналов рекомбинации (включая примесное краевое излучение). При этом, в согласии с существующими представлениями, наличие люминесценции в области края поглощения и прямозонность энергетической структуры кристалла являются необходимыми условиями возникновения стримеров в по-

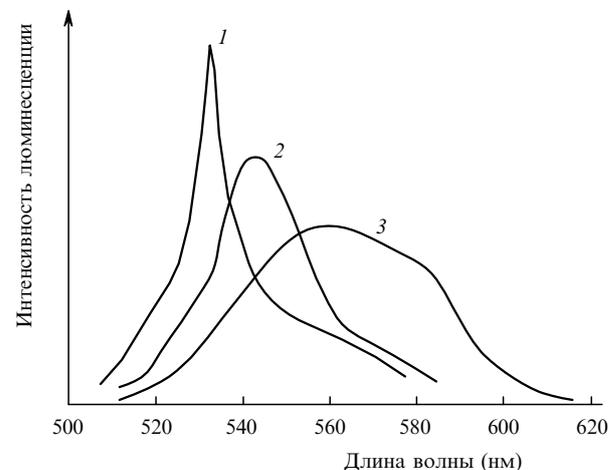


Рис.5. Спектры стримерной люминесценции (1, 2) и фотолюминесценции (3) кристаллов $CaGa_2S_4 - Eu$ при $T = 80$ (1, 2) и 300 К (3). Возбуждение осуществляется излучением импульсного азотного лазера ЛГИ-21 ($\lambda = 337.1$ нм, $\tau \sim 10$ нс, $P_{av} = 3$ мВт).

лупроводниках. Подобная энергетическая структура обеспечивает высокий квантовый выход излучения, принимающего (по данным [10]) непосредственное участие в формировании разряда. Следует отметить, что слоистым соединениям присущи особенности, обусловленные различием свойств среды в плоскости слоя (двумерность, взаимодействие слоев и др.) и перпендикулярно ей, которые могут влиять на формирование стримеров.

6. Заключение

Разработан метод повышения более чем на порядок (до $\sim 10^6$ импульсов) ресурса стримерного лазера в условиях предельных режимов работы, основанный на использовании защитного слоя из однотипного полупроводника с ориентацией, соответствующей минимальным изменениям направлений распространения стримеров на границе перехода защитный слой – излучатель. Установлено, что микрорельеф в виде фигур травления размером порядка длины волны света на поверхности перехода между защитным кристаллом и активным элементом повышает эффективность излучателя в целом.

Обнаружено влияние стримерных разрядов на люминесцентные свойства полупроводника, проявляющееся в обратимой перестройке спектра его фотолюминесценции. Спектральные изменения свидетельствуют о возникновении в приповерхностной области комплексов, связанных с дефектами, а также о наличии процессов хими-

ческого разложения кристалла под действием разрядов. Определены условия минимизации данного явления с целью повышения ресурса и стабильности характеристик стримерного лазера. Обнаружено и изучено стримерное свечение в новых перспективных соединениях $\text{CaGa}_2\text{S}_4 : \text{Eu}$, $\text{Ca}_4\text{Ga}_2\text{S}_7 : \text{Eu}$ и показано, что закономерности разрядов в слоистых кристаллах аналогичны таковым для квазидвумерных сред.

Авторы выражают благодарность Р.Б.Джаббарову за предоставление кристаллических образцов и обсуждение результатов.

1. Басов Н.Г., Молчанов А.Г., Насибов А.С., Обидин А.З., Печенов А.Н., Попов Ю.М. *ЖЭТФ*, **70**, 1751 (1976).
2. Грибковский В.П. *ЖПС*, **40**, 709 (1984).
3. Грибковский В.П., Парашук В.В., Яблонский Г.П. *Квантовая электроника*, **16**, 1145 (1989).
4. Грибковский В.П., Парашук В.В., Яблонский Г.П. В сб. *Квантовая электроника* (Киев: Наукова думка, 1990, № 38, с. 1).
5. Гурский А.Л. *ЖПС*, **66**, 601 (1999).
6. Яблонский Г.П. *ФТТ*, **26**, 995 (1984).
7. Яблонский Г.П., Беляева А.К. *Физ. и хим. обраб. матер.*, **4**, 30 (1989).
8. Грибковский В.П. *Доклады АН БССР*, **29**, 896 (1985).
9. Тагиев Б.Г., Абдуллаев А.Б., Тагиев О.Б. и др. *ЖПС*, **62**, 145 (1995).
10. Грибковский В.П., Парашук В.В., Русаков К.И. *ЖТФ*, **64**, 169 (1994).
11. Миронов А.Л., Зубарев А.И., Шпак В.Г., Быков В.В. *ЖТФ*, **60**, 203 (1990).