

К. И. Русаков, В. В. Парашук, Р. Б. Джаббаров

НОВЫЕ АКТИВНЫЕ СРЕДЫ И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРИМЕРНЫХ ЛАЗЕРОВ

Стримерный разряд в полупроводниках рассматривается как разновидность неразрушающего электрического пробоя твердых тел и является высокоэффективным методом получения инверсной населенности в однородных средах при возбуждении короткими импульсами электрического поля [1]. Исследование свойств стримерных разрядов открывает новые возможности для изучения нелинейных оптических, электрических, акустических и других явлений в твердых телах [2]. Цель настоящей работы – выяснение закономерностей воздействия интенсивного излучения и сильного электрического поля, создаваемых стримерным разрядом, на полупроводниковую активную среду, разработка методов существенного повышения ресурса и эффективности стримерного лазера при предельных режимах работы, а также поиск новых перспективных активных сред. Ранее по данным вопросам сообщались предварительные результаты исследований [3 – 6].

Повышение ресурса и эффективности стримерного лазера при предельных режимах эксплуатации

Увеличение ресурса, стабильности и улучшение некоторых других базовых характеристик стримерного лазера является одной из проблем, которая полностью не решена до настоящего времени. Решение этой задачи требует учета взаимодействия разряда со средой, в частности комплексного воздействия на среду сильных электрических и оптических полей, а также других интенсивных факторов, сопровождающих разряд. Актуальность данного вопроса возрастает в случае предельных режимов эксплуатации ПСЛ.

Опыт показывает, что максимальная интенсивность стримерного разряда достигается при возбуждении через дополнительный разрядный промежуток в окружающей среде (диэлектрической жидкости), обостряющий фронт прикладываемого импульса напряжения [2, 7]. В этом случае для увеличения срока службы излучающего элемента требуется применение специальных мер его защиты от непосредственного воздействия искрового разряда в жидкости. В качестве таких мер является использование предохраняющего (буферного) материала от воздействия на рабочий кристалл сильного электрического поля и искрового разряда. Одновременно буферный слой 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. В итоге было установлено, что наибольшей эффективностью в указанном смысле характеризуется система, состоящая из рабочего кристалла - пластинки CdS толщиной $\sim 0,5$ мм, ориентированной в плоскости типа $\{0001\}$, и защитного слоя из этого же кристалла толщиной ~ 1 мм, вырезанного в плоскости $\{1\bar{2}10\}$ (рис. 1).

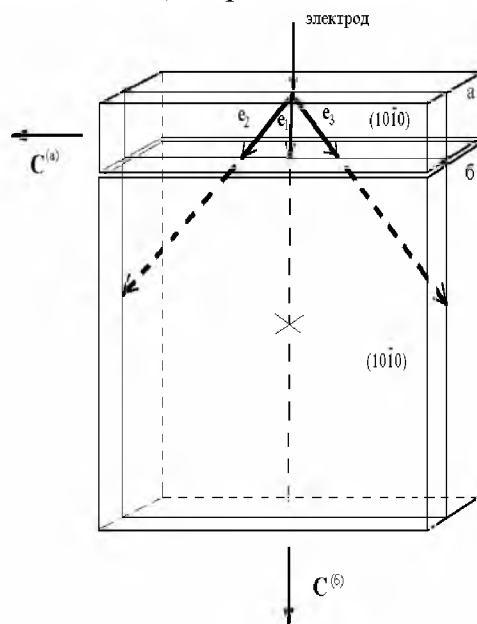


Рис. 1. Схема возбуждения разрядов и взаимная ориентация защитного (буферного) (а) и рабочего (б) кристаллов CdS в импульсно-периодическом режиме

В плоскости $\{0001\}$ проекции стримерных треков образуют шестилучевую звезду, что облегчает наблюдения, а во втором образце разряды распространяются под некоторыми углами к нормали. Наибольшая длина стримерных треков и интенсивность их свечения наблюдаются при такой геометрии перехода (оптимальные условия), когда пространственная ориентация стримеров в защитном (буферном а) и рабочем (б) кристаллах практически одинакова. Это соответствует наименьшим потерям энергии при переходе и обеспечивает минимальные разрушения поверхности рабочего тела. 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 значению $\pm 45^\circ$ относительно оси С.

В описанной геометрии возбуждения одиночными импульсами с частотой следования до 50 Гц и амплитудой не более 50 кВ в рабочем кристалле на протяжении, как минимум, 1.5 – 2.0 ч наблюдалась устойчивая картина стримерных треков без заметного снижения интенсивности свечения, что при прочих равных условиях на 1 – 2 порядка превышает литературные данные и соответствует $N \sim 10^6$ импульсов. Влияние защитного слоя на интенсивность стримерного излучателя и его ресурс показано на рис. 2.

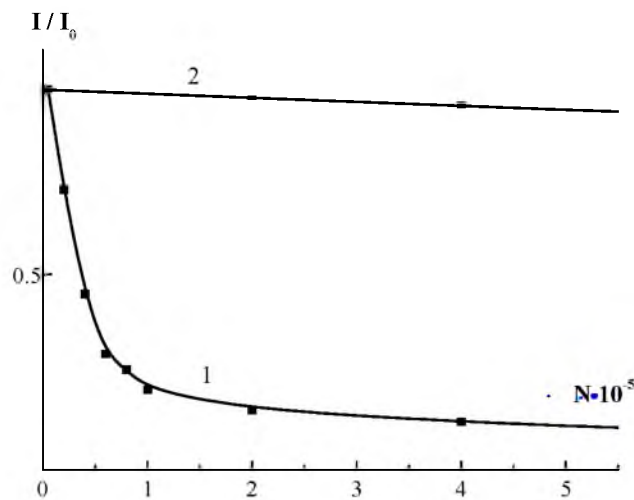


Рис. 2. Сравнительная интенсивность свечения стримерных разрядов в зависимости от экспозиции в отсутствие (1) и при наличии буферного слоя (2)

Следует отметить, что при предельных режимах в защитном материале возникают разрушения в виде глубокого, почти сквозного кратера, тогда как в рабочем кристалле они имеют незначительную глубину проникновения, практически на уровне начальной стадии разрушений (рис. 3). С увеличением количества возбуждающих импульсов до $\sim 10^5$ размеры кратера возрастают и для восстановления начальной энергии излучения необходимо сдвигать игловой электрод от исходного положения на расстояние $\sim 1.2 - 1.4$ мм.

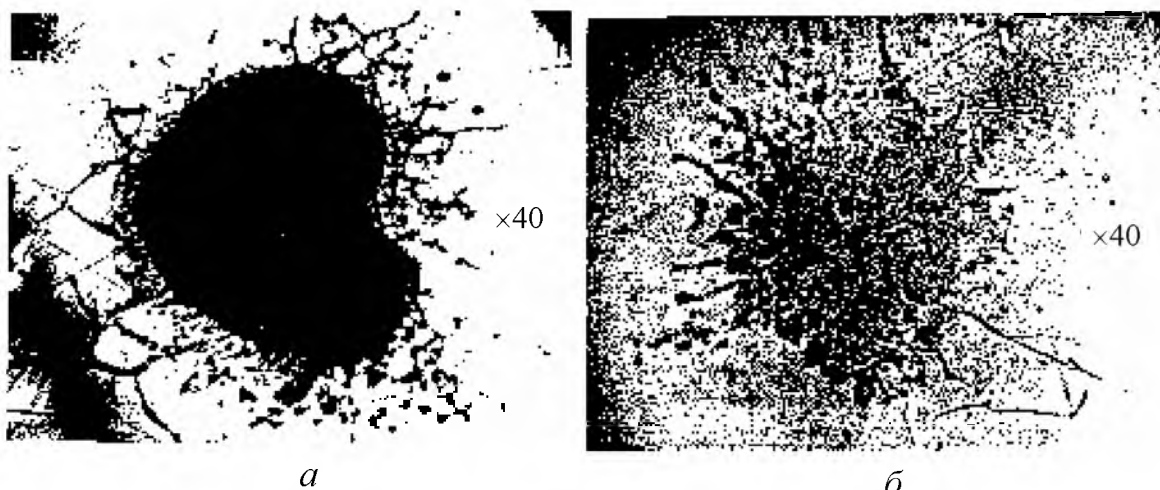


Рис. 3. Состояние поверхности защитного (буферного) (а) и рабочего (б) кристаллов CdS при импульсно-периодическом режиме возбуждения стримеров

Влияние кристаллического микрорельефа на эффективность генерации света при стримерном возбуждении

Изучены условия перехода разрядов между кристаллами для случая, когда в роли рабочего кристалла использовался образец в виде пластины толщиной не более 100 мкм, имеющий одну полированную поверхность, а другую - травленную с микрорельефом, элементы которого сравнимы с длиной волны света [8]. При этом поверхностью перехода стримеров служила поверхность микрорельефа, а буферным кристаллом - образец с двумя полированными поверхностями толщиной 1 – 2 мм, ориентированный указанным выше образом (рис. 4). Резонатор лазера образован поверхностью микрорельефа и противоположной ей поверхностью рабочего кристалла.

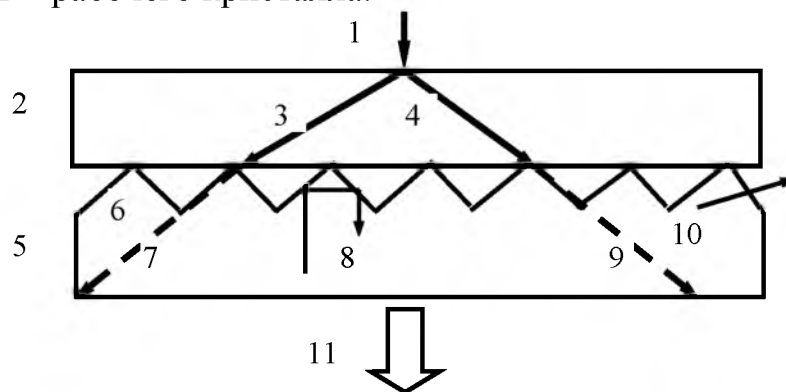


Рис. 4. Схема возбуждения генерации света в лазерной системе при наличии микрорельефа

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

На систему подавались пакеты импульсов амплитудой до 150 – 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 значительным усилением стримерного свечения (в 2 – 3 раза). На основании данных работы [8] можно полагать, что микрорельеф на поверхности излучателя приводит к значительному увеличению потерь для неаксиальных мод и повышению эффективности отражения (возврата) излучения в активную среду, вследствие чего возрастает КПД генерации.

Разрушения, возникающие на естественных поверхностях фигур травления микрорельефа, прогрессируют медленнее, чем в случае гладкой поверхности. При этом возрастает лучевая прочность такого излучателя и его эффективность в целом.

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 температурах. Использовались образцы в виде плоскопараллельных пластинок толщиной 0.5 – 1.1 мм, ориентированных в плоскостях $(1\ 0\ \bar{1}0)$ 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 ЛГН-409 с длиной волны излучения 325 нм при комнатной температуре и при температуре жидкого азота.

Установлено, что в условиях использовавшегося в качестве диэлектрической среды авиационного керосина при $T = 300$ К воздействие на кристалл (экспозиция) $N \sim 5 \cdot 10^3$ разрядов приводит к снижению интенсивности ФЛ примерно в 2 раза по сравнению с начальной интенсивностью аналогично данным работ [9, 10]. В соответствии с этими данными в ряде широкозонных полупроводников под воздействием УФ лазерного излучения происходит дефектообразование и фоторазложение, а также существенное снижение интенсивности собственной люминесценции после облучения. Поэтому в нашем случае предпринимались специальные меры по устранению

возможного влияния излучения He-Cd лазера на результаты проводимых исследований. Дальнейшая экспозиция при $N \sim 5 \cdot 10^3$ также сопровождалась уменьшением интенсивности ФЛ. Затем опыты были повторены при $T = 78$ К с целью контроля поведения экситонных линий. Особенность поведения этих линий состоит в зависимости их интенсивности от экспозиции, в частности в постепенном ее увеличении в ~ 10 раз при $N = 1.5 \cdot 10^4$ и резком уменьшении после $N = 2.5 \cdot 10^4$. Данный эффект усиления-тушения ФЛ носит обратимый характер, так как воспроизводится после выдержки в течение времени $\tau \sim 24$ ч при $T = 300$ К.

На рис. 5 показана перестройка спектра ФЛ с ростом экспозиции до $N = 3 \cdot 10^4$. Интенсивность "зеленой полосы" уменьшается приблизительно в два раза по сравнению со случаем $N = 2.5 \cdot 10^4$, полуширина ее увеличивается, а экситонные линии исчезают, что свидетельствует о сильном изменении состояния поверхности кристалла. Наблюдаемую трансформацию спектра можно объяснить интенсивным разложением приповерхностного слоя с образованием безызлучательных дефектов и комплексов. Вследствие совместного действия сильного электрического поля и мощного излучения разрядов в приповерхностном 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 ионизированные (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 жидкости авиационного керосина воздействие искрового разряда и сильного электрического поля приводят к разложению больших органических молекул на мелкие части и образованию различных ассоциатов с дефектами на поверхности кристаллической решетки. Разложение монокристаллов CdS не стимулируется гексаном, этилацетатом и этанолом [11]. Опыты по стримерной накачке в гексане и серном эфире указали на отсутствие перестройки спектра даже при экспозиции $N = 3 \cdot 10^4$, что свидетельствует о меньшей интенсивности процессов разложения поверхности сульфида кадмия в этих жидкостях по сравнению с керосином в рассматриваемых условиях.

Таким образом, изложенные выше результаты можно объяснить возникновением дефектов решетки в приповерхностном слое кристалла

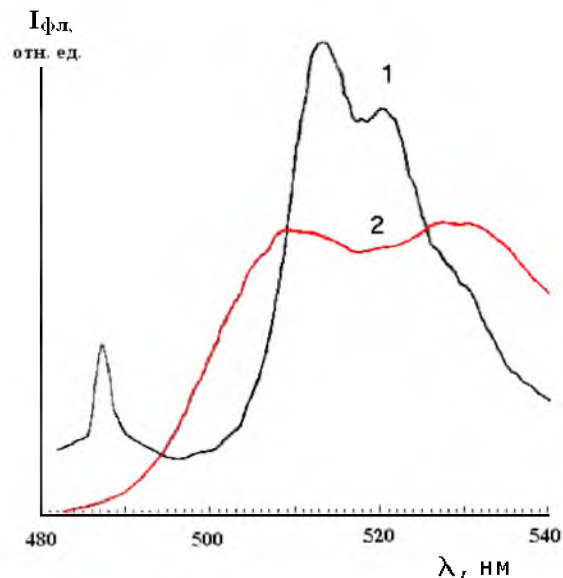


Рис. 5. Спектры ФЛ монокристаллов CdS в зоне воздействия стримерного разряда при экспозиции $N=2.5 \cdot 10^4$ (1) и $3 \cdot 10^4$ (2); $T = 80$ К

и его последующим химическим разложением при совместном действии сильного импульсного электрического поля и фотохимических реакций, т. е. комплексным воздействием стримерного разряда. Путем выбора окружающей диэлектрической среды представляется возможным минимизировать влияние указанных факторов с целью повышения ресурса и улучшения характеристик стримерного лазера.

Поиск новых перспективных активных сред

Стримерные разряды получены и исследованы (с участием авторов) в ряде бинарных, тройных и более сложных соединений, как хорошо изученных, так и новых (см. обзор [2]): 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); AgGaS₂ (~ 550 нм), CuGaS₂, CuGaSe₂ (820 – 960 нм), $CuGaS_{2x}Se_{2(1-x)}$ (700 – 960 нм). Общий итог этих исследований – стримерные разряды как быстропротекающее явление носят характер кооперативных самоорганизованных процессов [12], в которых оптическим явлениям отводится важнейшая роль. При этом результаты исследования эффективности полупроводникового лазера с использованием микрорельефа при оптической накачке [8] положены в основу разработки мощных полупроводниковых лазеров (излучающих зеркал), накачиваемых электронным пучком [13], и оказались

полезными, как отмечалось выше, для увеличения мощности (КПД) и ресурса стримерного лазера.

В заключение остановимся на результатах изучения условий возбуждения, пространственных и оптических свойств разрядов еще в одной интересной среде - кристаллах $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{EuF}_3$, $\text{Ca}_m\text{Ga}_2\text{S}_n$ ($m = n - 3$) - представителях широкозонных соединений типа $\text{A}^{\text{II}}\text{B}_2^{\text{III}}\text{C}_4^{\text{VI}}$ [5]. Это монокристаллы орторомбической симметрии класса D_{2h}^{24} и кубической сингонии, характеризующиеся слоистой кристаллической структурой при толщине слоевого пакета $\sim 30 - 100$ мкм [14]. Рассматриваемые соединения являются модельным объектом для исследования закономерностей стримерных разрядов в квазидвухмерных средах. Привлекательность соединений рассматриваемого типа обусловлена и тем, что выполненные нами ранее попытки возбудить стримерные разряды в высокоомных слоистых монокристаллах типа GaSe, широко применяемых в научных исследованиях и на практике, не привели к успеху. Использование неразрушающих разрядов расширяет возможности изучения реальной слоистой кристаллической структуры, ее электрических и оптических свойств.

Исследовались совершенные монокристаллы $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Eu}$ и $\text{Ca}_4\text{Ga}_2\text{S}_7:\text{Eu}$ размером $\sim 5 \times 3 \times 1$ мм с удельным сопротивлением $\sim 10^9 - 10^{10}$ Ом·см, выращенные диффузионным методом газотранспортной реакции. Рабочая поверхность образца получена путем скалывания, разряды возбуждались импульсами напряжения амплитудой ~ 50 кВ и длительностью ~ 100 нс через разрядный промежуток в диэлектрической жидкости по стандартной методике [1,2,8] и в пакетно-импульсном режиме [7]. Определены условия возникновения разрядов при комнатной температуре и температуре жидкого азота в зависимости от геометрии опыта, амплитуды и полярности возбуждающих импульсов. Наблюдались одиночные кристаллографически ориентированные разряды (по предварительным данным в направлениях типа [100] для CaGa_2S_4 и [110] для $\text{Ca}_4\text{Ga}_2\text{S}_7$), локализованные в плоскости слоевого пакета, с выходом основной части светового потока вдоль канала. Переход от $T = 300$ К к 77 К приводит к заметному увеличению интенсивности разряда. Образование одиночных разрядов, снижение общего числа стримеров и их типов наблюдалось нами ранее в стержневидных и пластинчатых кристаллах CdS и интерпретируется в рамках представления о взаимодействии электромагнитных волн микроволнового и видимого диапазонов, инициированных разрядом [15, 16]. В более общем плане такой подход соответствует представлению о стримерах как о самоорганизованных процессах [12] и

согласуется с полученным результатом. Следует отметить, что интенсивность стримерной люминесценции (СЛ) исследуемых кристаллов сравнима с ФЛ неактивированных образцов при средних уровнях лазерного возбуждения. Этот факт и анализ спектров СЛ и ФЛ при различных температурах позволяют сделать вывод о собственном характере свечения соединений типа $A^{II}B_2^{III}C_4^{VI}$ при стримерном возбуждении и о существенной роли излучательных процессов в формировании указанных разрядов.

Заключение

Разработан метод повышения более чем на порядок (до $\sim 10^6$ импульсов) ресурса стримерного лазера при предельных режимах работы, суть которого заключается в использовании основных свойств стримерных разрядов в полупроводниках - кристаллографической направленности и способности разряда переходить из кристалла в кристалл, а также особенностей этого перехода для стримеров разного типа. При этом необходим защитный слой из однотипного полупроводника с ориентацией, соответствующей минимальным изменениям направлений распространения стримеров на границе перехода защитный слой-излучатель. Установлено, что наличие микрорельефа в виде фигур травления с размером порядка длины волны света на поверхности перехода между защитным кристаллом и активным элементом повышает эффективность излучателя в целом. Нелинейное взаимодействие излучения разряда с полупроводником в волноводном режиме уменьшает разрушения кристаллической решетки.

На примере кристаллов CdS обнаружено влияние стримерных разрядов на излучательные свойства активной среды, проявляющееся в возникновении обратимых изменений интенсивности и перестройки ее спектра ФЛ. Предполагается, что спектральные изменения обусловлены образованием в приповерхностной области комплексов, связанных с дефектами, и процессами химического 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 $CaGa_2S_4:EuF_3$, $Ca_mGa_2S_n$ ($m = n - 3$) с орторомбической и кубической симметрией и показано, что закономерности разрядов в слоистых кристаллах подобны свойствам стримеров в пластинчатых (квазидвумерных) средах.

Литература

1. *Basov N. G., Molchanov A. G., Nasibov A. S., et al.* Laser Action in Semiconductor and Dielectrics Excited by the Electric Field // IEEE J. Quant. Electron. 1974. Vol. QE-10, № 9. P. 794 – 796.
2. *Грибковский В. П.* Стримерное свечение в полупроводниках // ЖПС. 1984. Т. 40, № 5. С. 709 - 718.
3. *Грибковский В. П., Паращук В.В., Русаков К.И.* Физика стримерных лазеров: Итоги и перспективы // Лазерная физика и спектроскопия: Матер. 4-й Междунар. конф. Гродно: ГрГУ, 1999. С.38 – 40.
4. *Грибковский В.П., Паращук В. В., Русаков К. И.* О воздействии стримерных разрядов на кристаллы CdS // Физика имп. воздействий на конденс. среды: Матер. VIII науч. школы. Николаев: Ин-т имп. процессов и технол. НАН Украины, 1997. С. 10.
5. *Грибковский В. П., Тагиев Б. Г., Джаббаров Р. Б., Паращук В. В.* Свечение электрических разрядов в монокристаллах CaGa₂S₄:Eu // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Сб. материалов IX науч. школы / Ин-т имп. процессов и технол. НАН Украины. - Николаев, 1999. - С. 28 – 29.
6. *Паращук В. В., Русаков К. И.* О динамике стримерного разряда в полупроводниках // Вестник БГТУ. Физ., мат., информ. 2004. № 5. С. 16 – 19.
7. *Грибковский В. П., Паращук В. В., Яблонский Г. П.* Стримерное возбуждение генерации в высокочастотном режиме // Квантовая электроника. 1989. Т. 16, № 6. С. 1145 – 1149.
8. *Грибковский В. П., Паращук В. В., Яблонский Г. П.* Повышение КПД и мощности полупроводникового лазера с оптической двухфотонной накачкой // Квантовая электроника / Ин-т полупроводников АН УССР. Киев: Наукова думка, 1990. Вып. 38. С. 1 – 7.
9. *Бохонов А. Ф., Творонович Л. Н., Яблонский Г. П.* Дефектообразование в кристаллах CdS и ZnSe под воздействием излучения азотного и эксимерного лазеров // ФТТ. 1988. Т. 30, № 6. С. 1585 – 1593.
10. *Яблонский Г. П.* Образование дефектов решетки в широкозонных полупроводниках A₂B₆ под воздействием излучения азотного лазера // ФТТ. 1984. Т. 26, № 4. С. 995 – 1001.
11. *Яблонский Г. П., Беляева А. К.* Фоторазложение полупроводников ZnS, ZnSe и CdS под воздействием УФ-излучения He-Cd-лазера // Физика и химия обработки материалов. 1989. № 4. С. 30 – 34.
12. *Грибковский В. П.* Стримеры в полупроводниках – кооперативные самоорганизованные процессы // Докл. АН БССР. 1985. Т. 29, № 10. С. 896 – 898.
13. *Гурский А. Л.* Лазеры с возбуждением электронным пучком на основе соединений A₂B₆ (Обзор) // ЖПС. 1999. Т. 66, № 5. С.601 – 618.
14. *Тагиев Б. Г., Абдуллаев А. Б., Тагиев О. Б., Джаббаров Р. Б.* Люминесцентные свойства соединений A^{II}B₂^{III}C₄^{VI} // ЖПС. 1995. Т. 62, № 3. С. 145 – 151.
15. *Грибковский В. П., Паращук В. В., Русаков К. И.* О кристаллографической ориентации стримерных разрядов // ЖТФ. 1994. Т. 64, № 11. С. 169 – 171.
16. *Паращук В. В., Грибковский В. П., Русаков К. И., Прокопеня А. Н.* Излучательные процессы при разряде в полупроводниках // Докл. АН Беларуси. 1997. Т. 41, № 3. - С. 43 – 47.