

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

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И РЕСУРСА СТРИМЕРНОГО ЛАЗЕРА

1. Введение. 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].

2. 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 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 ~ 0,5 мм, ориентированной в плоскости типа {0001}, и защитного слоя из этого же кристалла толщиной ~ 1 мм, вырезанного в плоскости {1210} (рис. 1).

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 *a*) и рабочем (*b*) кристаллах практически одинакова. Это соответствует наименьшим потерям энергии при переходе и обеспечивает минимальные разрушения поверхности рабочего тела. Так как плоскости (1010) 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 *C*.

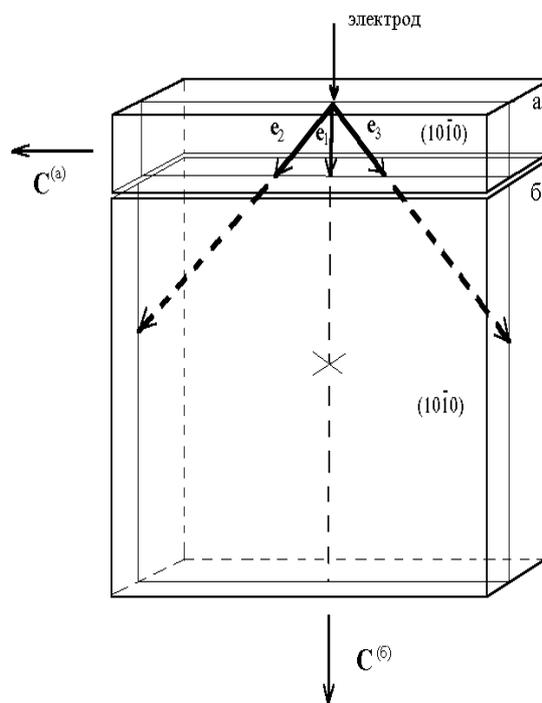


Рис. 1. Схема возбуждения разрядов и взаимная ориентация защитного (буферного) (*a*) и рабочего (*b*) кристаллов CdS в импульсно-периодическом режиме.

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.

Паращук Валентин Владимирович, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси. Беларусь, ИФ НАН Б, 220072, г. Минск, пр. Ф.Скорины, 70.

Русаков Константин Иванович, к.ф.-м.н., доцент каф. физики Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Джаббаров Расим Бабаевич, к.физ.-мат.н., ведущий научный сотрудник Института физики НАН Азербайджана. Республика Азербайджан, 370143, г. Баку, пр. Г. Джавида, 33.

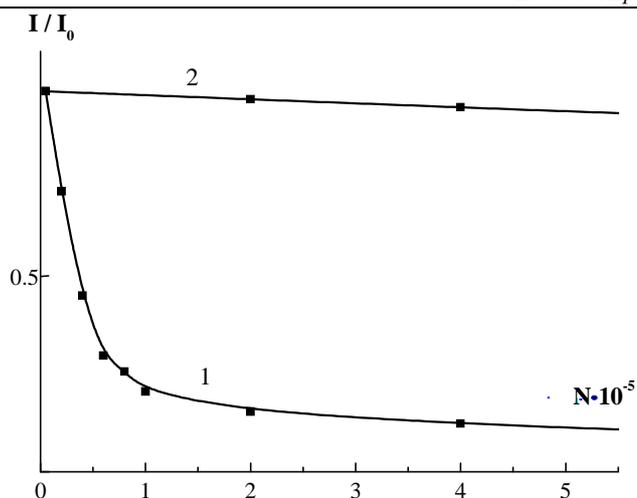


Рис. 2. Сравнительная интенсивность свечения стримерных разрядов в зависимости от экспозиции в отсутствие (1) и при наличии буферного слоя (2).

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.

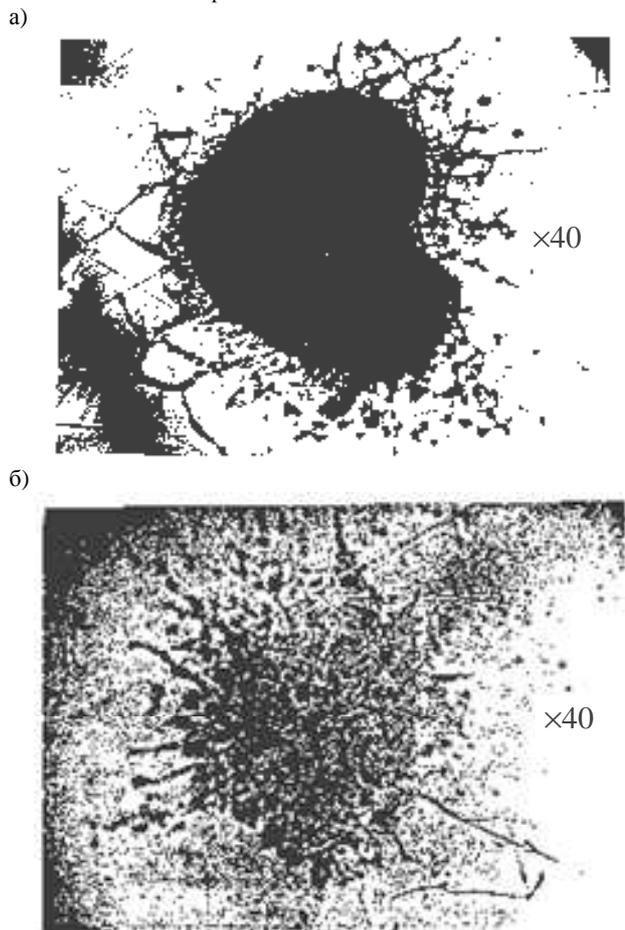


Рис. 3. Состояние поверхности защитного (буферного) (а) и рабочего (б) кристаллов CdS при импульсно-периодическом режиме возбуждения стримеров.

3. 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.

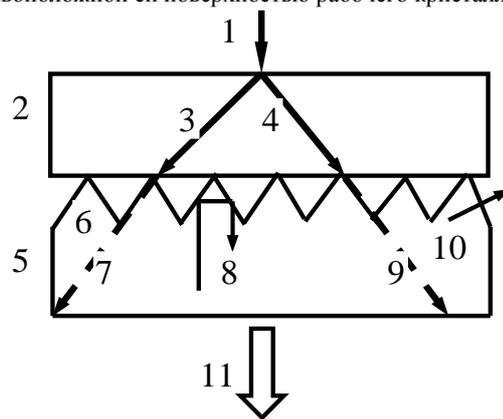


Рис. 4. Схема возбуждения генерации света в лазерной системе при наличии микрорельефа:

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.

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 температурах. Использовались образцы в виде плоскопараллельных пластинок толщиной 0.5 – 1.1 мм, ориентированных в плоскостях (1010) 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 фото-разложение, 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.

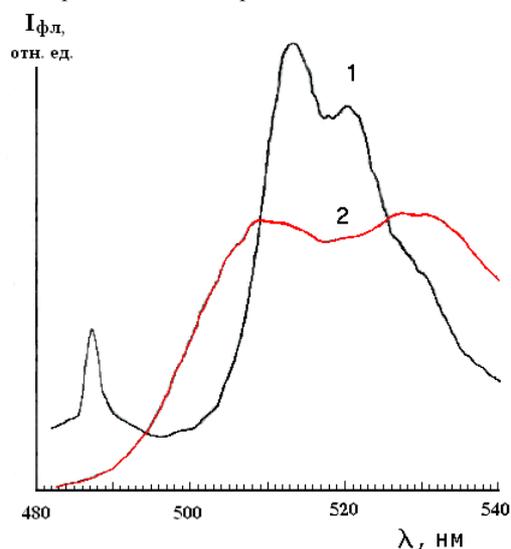


Рис. 5. Спектры ФЛ монокристаллов CdS в зоне воздействия стримерного разряда при экспозиции $N = 2.5 \cdot 10^4$ (1) и $3 \cdot 10^4$ (2); $T = 80$ К.

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 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.

5. 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); $AgGaS_2$ (~ 550 нм), $CuGaS_2$, $CuGaSe_2$ (820-960 нм), $CuGaS_2xSe_{2(1-x)}$ (700 - 960 нм). Общий итог этих исследований - стримерные разряды как быстропотекающее явление несут 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 $CaGa_2S_4:EuF_3$, $Ca_mGa_2S_n$ ($m = n - 3$) - предшественных широкозонных соединений типа $A^{II}B_2^{III}C_4^{VI}$ [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 $CaGa_2S_4:Eu$ и $Ca_4Ga_2S_7:Eu$ 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 скальвания, 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 $Ca_4Ga_2S_7$), 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 об-

шем 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 $A^{IV}B_2^{III}C_4^{VI}$ 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 $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{EuF}_3$, $\text{Ca}_m\text{Ga}_2\text{S}_n$ ($m=n-3$) с орторомбической и кубической симметрией и показано, что закономерности разрядов в слоистых кристаллах подобны свойствам стримеров в пластинчатых (квазидвумерных) средах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Basov N.G., Molchanov A.G., Nasibov A.S., Obidin A.Z., Pechenov A.N., Popov Yu.M. 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 фи-

- зика и спектроскопия: Сб. матер. 4-й Междунар. конф. / Гродненский гос. ун-т. - Гродно, 1999. - Ч.1. - 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: Материалы VIII науч. школы, Николаев, август 1997 г. / Ин-т имп. процессов и технол. НАН Украины. - Николаев, 1997. - С. 10.
 5. Грибковский В.П., Тагиев Б.Г., Джаббаров Р.Б., Паращук В.В. Свечение электрических разрядов в монокристаллах $\text{CaGa}_2\text{S}_4:\text{Eu}$ // 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 A_2B_6 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 A^2B^6 (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 $\text{A}^{IV}\text{B}_2\text{C}_4^{VI}$ // 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.

УДК 551.510.7; 645.625.162.4

Кушнер Т.Л., Куликовский Д.Г.

МОНИТОРИНГ РАДИАЦИОННОГО ФОНА В ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ Г. БРЕСТА

При рассмотрении вопросов, связанных с ущербом, который наносит организму человека радиационное излучение, необходимо иметь данные об уровне радиационного фона. Человек испытывает фоновое облучение от естественных и искусственных источников. В свою очередь естественный фон кроме природной составляющей (космические излучения, радиоактивные изотопы земной коры и атмосферы, радионуклиды в организме самого человека) имеет и техногенное происхождение. Изменение человеком окружающей среды и его деятельность могут увеличить дозы "нормального"

облучения за счет естественных источников. Примеры такой деятельности - добыча полезных ископаемых, использование в домостроении строительных материалов минерального происхождения, содержащих повышенное количество радионуклидов, сжигание ископаемого топлива, в частности угля, приводящее к выбросу естественных радионуклидов (^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{232}Th и др.). Такой фактор, как простое проживание в доме, приводит к повышенному облучению, если в здании накапливаются газообразные радионуклиды и их продукты распада. Наибольший вклад в дозу облучения в этом случае

Кушнер Татьяна Леонидовна, ст. преподаватель каф. физики Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.