На правах рукописи

Липатов Евгений Игоревич

ОПТОЭЛЕКТРОННОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ В ПРИРОДНОМ И СИНТЕТИЧЕСКОМ АЛМАЗЕ ПРИ УПРАВЛЕНИИ УФ ИЗЛУЧЕНИЕМ И ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ

01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2011

Работа выполнена в Томском государственном университете и Институте сильноточной электроники СО РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Тарасенко Виктор Федотович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Копылова Татьяна Николаевна

кандидат физико-математических наук, с.н.с.
Панченко Юрий Николаевич

Ведущая организация: Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Защита состоится «19» января 2012 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.267.04 при Томском государственном университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, ауд. 119.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета по адресу: 634050, Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан «16» декабря 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Б.Н. Пойзнер

Актуальность работы. Коммутаторы высоких напряжений и больших мощностей нашли свое применение от научно-исследовательских до промышленных приложений [1*, 2*]. Широко применяются коммутаторы на основе газовых разрядников, таких как тиратроны и тригатроны, и полупроводниковых приборов, таких как тиристоры. При этом газовые разрядники работают только на включение, тем самым ограничивается их сфера применения емкостными накопителями энергии. Для них достигаются следующие рабочие параметры: время коммутации (передний фронт) менее 10 нс, рабочее напряжение до 3 МВ, частота повторения импульсов до 1 кГц (в условиях прокачки газовой смеси). Полупроводниковые коммутаторы работают как на включение, так и на выключение, т.е. как с емкостными, так и с индуктивными накопителями энергии. При этом полупроводниковые коммутаторы проигрывают газовым по рабочему напряжению (обычно до 5 кВ), выигрывая по скорости коммутации (до 100 пс передний фронт, и до 1 нс задний фронт) и по частоте повторения импульсов (до 100 кГц).

Полупроводниковые коммутаторы по типу управления можно разделить на два вида:

- инжекционные;
- оптоэлектронные.

В инжекционных коммутаторах переключение происходит при инжекции электронно-дырочных пар через контакты, что является сравнительно медленным (~ 1 мм/мкс), но энергетически выгодным процессом. По этой причине инжекционные полупроводниковые коммутаторы эффективно работают в микро- и наносекундном временном диапазоне.

В оптоэлектронных коммутаторах управление происходит путем создания в рабочем теле высокой концентрации неравновесных носителей заряда при поглощении фотонов оптического диапазона (от УФ до БИК в зависимости от полупроводникового материала), т.е. с помощью оптоэлектронного переключения.

Основной создания оптоэлектронных коммутаторов обычно выступают традиционные полупроводники – кремний и арсенид галлия [1*]. Оптопарой для кремния выступает Nd:YAG-лазер ($\lambda_Л$ = 1062 нм), для GaAs – светодиод на его основе ($\lambda_{СИД}$ = 870 нм). При этом достигнуты фронты включения и выключения в десятки пикосекунд. Однако величины рабочих напряжений для коммутаторов на основе Si и GaAs не превышают нескольких сотен киловольт. Значительно повысить рабочие напряжения полупроводниковых коммутаторов можно при использовании широкозонных полупроводников.

Интерес к алмазу в качестве материала для твердотельных коммутаторов возник ввиду наилучших требуемых характеристик по сравнению с другими полупроводниками (см. таблицу 1).

Таблица 1. Физические характеристики некоторых беспримесных полупроводников

Материал	Ширина запрещенной зоны, эВ	Напряжение пробоя, В·см$^{-1}$	Удельное сопротивление, Ом·см	Диэлектрическая постоянная	Подвижность, см^2·В$^{-1}$·с$^{-1}$	
					электронов	дырок
Алмаз (*C*)	5.5	10^7	$>10^{12}$	5.7	4 500	3 800
Карбид кремния (*SiC*)	3.26	$5\cdot10^6$	10^{10}	9.8	900	320
Нитрид галлия (*GaN*)	3	$3\cdot10^6$	10^9	8.9	2 000	350
Арсенид галлия (*GaAs*)	1.42	$4\cdot10^5$	10^7	12.9	8 500	400
Кремний (*Si*)	1.12	$3.7\cdot10^5$	10^4	11.7	1 500	450
Германий (*Ge*)	0.66	$2\cdot10^5$	10^2	16.2	3 900	1 900

Алмаз характеризуется большой шириной запрещенной зоны, крайне высоким удельным сопротивлением и напряжением пробоя, что обеспечит низкие токи утечки, высокое рабочее напряжение и электрическую прочность (влияющую на срок службы).

Скорость выключения оптоэлектронного коммутатора (длительность заднего фронта $t_с$) целиком и полностью определяется временем жизни носителей $t_ж$. Скорость включения оптоэлектронного коммутатора (длительность переднего фронта $t_р$) ограничена временем распространения электромагнитной волны t_r в материале рабочего тела [3*, 4*]:

$$t_r = \frac{3}{2}\cdot\sqrt{\varepsilon}\cdot\frac{d}{c}, \qquad (1)$$

где ε, d и c – диэлектрическая постоянная материала, межэлектродный зазор и скорость света в вакууме. Для получения минимального $t_р$ необходимо использовать материал рабочего тела с наименьшей диэлектрической постоянной и высокой электрической прочностью (чтобы минимизировать межэлектродный зазор). Алмаз имеет наилучшие характеристики из известных материалов. Для d = 0.1 мм время переключения не может быть быстрее $t_р$ = 1.2 пс (рабочее напряжение ограничено 100 кВ/см).

В условиях больших напряженностей электрического поля происходит насыщение скорости носителей заряда за счет снижения их подвижности [5*]. При этом ток через коммутатор $I_ф$ определяется как

$$I_ф = e\cdot n\cdot\frac{v_н}{d}, \qquad (2)$$

где e, n и $v_н$ – заряд электрона, концентрация носителей заряда, насыщенная скорость носителей заряда (для алмаза $2.7 \cdot 10^7$ см/с, что почти в 3 раза больше, чем для GaAs).

Недостаточное развитие технологий допирования алмаза и создания на его основе *p-n-p-n* – структур [6*] определило необходимость управления работой алмазных твердотельных коммутаторов внешним импульсным воздействием энергетичных частиц, создающим высокую концентрацию неравновесных носителей заряда, т.е. с помощью оптоэлектронного переключения [5*, 7*].

Первоначальные исследования (80-е годы) оптоэлектронного переключения в алмазе проводились на природных образцах 2а [8*–13*], 2б [12*] и 1а [5*, 7*, 12*] типов (подробно физическая классификация природных алмазов рассмотрена в [5*, 7*, 14*]). В то время природные образцы значительно превосходили синтетические по оптическим, электронным и прочим свойствам. При этом доступными для промышленного применения являлись природные алмазы небольших размеров до 10 мм^3, что недостаточно для применения в сильноточной электронике.

Размерные ограничения характерны и для синтетических образцов, полученных ВДВТ-методом, т.е. в условиях высоких давлений (>10 кбар) и высоких температур (>1 200 К) [15*, 16*].

В 90-е годы началось успешное развитие технологии синтеза алмазов ХПО-методом (химическое парогазовое осаждение, по аналогии с англ. – chemical vapor deposition, CVD) [17*–20*]. В настоящее время доступны поликристаллические алмазные пластины диаметром до 10 см и толщиной до 3 мм [20*]. Постоянно совершенствуются их оптические и электронные свойства, что необходимо для создания алмазных оптоэлектронных коммутаторов больших мощностей.

Для управления оптоэлектронными алмазными коммутаторами использовалось импульсное лазерное излучение на длине волны 193 нм [11*], 220–222 нм [8*, 10*, 21*], 248 нм [3*, 4*, 13*, 22*], 266 [12*], 353–355 нм [9*, 12*, 21*], 532 нм [12*] и электронные пучки с энергией электронов в максимуме распределения 100–160 кэВ [23*, 28*].

Управление алмазным оптоэлектронным коммутатором с помощью лазерного и спонтанного излучения, а так же электронного пучка обеспечивает стабильность запуска и высокую эффективность переключения. Управление алмазными оптоэлектронными коммутаторами с помощью источников спонтанного излучения предполагает принципиальную возможность обеспечить компактность размеров и экономическую обоснованность. Помимо этого, развитие алмазных светодиодов с длиной волны излучения $\lambda_{СИД}$ = 235 нм [24*–26*]

предполагает появление полноценной оптопары для алмазных оптоэлектронных коммутаторов.

Целью настоящей работы, начатой в 2000 г., является формулировка требований к характеристикам алмазных образцов и управляющего воздействия, экспериментальное исследование оптического пропускания, фото- и катодолюминесценции образцов природного и синтетического алмаза, формирование и исследование радиационной стойкости к УФ излучению металлических контактов к алмазу, создание оптоэлектронных алмазных коммутаторов и исследование их коммутационных характеристик.

Для реализации поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Анализ спектров оптического пропускания и фото- и катодолюминесценции природных и синтетических алмазных образцов, оценка концентрации и измерении кинетики затухания оптических центров.
2. Определение порога радиационной стойкости контактов к алмазным образцам в зависимости от материала и способа напыления при облучении импульсным лазерным излучением наносекундной длительности.
3. Определение режимов эффективной работы оптоэлектронных алмазных коммутаторов для различных конфигураций образцов, электрических контактов и управляющих источников излучения.
4. Уменьшение влияния фактов, ограничивающих эффективную работу оптоэлектронных алмазных коммутаторов.

Методы исследования. Решение поставленных задач осуществлялось на основе лабораторных экспериментов и математических оценок. В исследованиях оптических свойств алмазных образцов применялись стандартные методики спектральных измерений с использованием современных измерительных приборов. При определении радиационной стойкости металлических пленок, напыленных на неметаллические прозрачные подложки, использовались стандартные методы измерения силы адгезии покрытий к подложкам, оптической микроскопии и методы измерений энергетических характеристик импульсного лазерного излучения. Для исследования режимов эффективной работы оптоэлектронных алмазных коммутаторов применялись стандартные методы измерений временных и энергетических характеристик импульсов лазерного излучения и методы измерений амплитудно-временных параметров электрических импульсов наносекундной длительности.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. В спектрах люминесценции природных алмазов, демонстрирующих электронно-колебательную систему *N3*, в наносекундном временном

диапазоне после начала импульса возбуждения доминирует система *N3* с бесфононной линией λ = 415.2 нм с характеристическим временем затухания 20–50 нс при комнатной температуре. При этом в миллисекундном временном диапазоне после начала импульса возбуждения в спектральной области 350–700 нм наблюдается бесструктурная *A*-полоса люминесценции с характеристическим временем затухания 7–10 мс, которая обусловлена собственными структурными дефектами.

2. Для тонких металлических пленок до 1 мкм, осажденных методом вакуумно-дугового распыления на неметаллические подложки, при воздействии лазерным излучением длительностью 10–50 нс существует диапазон плотностей поглощенной энергии (50–350 мДж/см^2) для которого наблюдается адгезионный режим разрушения пленки. При этом максимальная температура разрушаемых пленок не превышает температуру плавления объемного материала. Пороговая плотность энергии для разрушения пленок в адгезионном режиме уменьшается на 10–20% при суммировании лазерных импульсов.

3. При поперечной геометрии алмазного коммутатора рост эффективности переключения при увеличении интенсивности управляющего лазерного излучения ограничен развитием лазерно-стимулированного пробоя межэлектродной поверхности коммутатора. При продольной геометрии алмазного коммутатора рост эффективности переключения при увеличении интенсивности управляющего лазерного излучения ограничен накоплением объемного заряда и стойкостью контактов к управляющему излучению.

4. Для алмазных коммутаторов с продольной геометрией снижение амплитуды импульса напряжения при накоплении управляющих лазерных импульсов на длине волны в области несобственного поглощения предотвращается чередованием полярности прикладываемого напряжения в диапазоне ± 0.5–20 кВ/см. При управлении алмазным коммутатором с помощью электронного пучка или лазерного излучения на длине волны в области фундаментального поглощения, чередование полярности не предотвращает снижения амплитуды импульса напряжения при накоплении управляющих импульсов.

Достоверность защищаемых положений и других результатов подтверждается: 1) согласием экспериментальных данных с результатами работ других авторов в случае близких условий проведения экспериментов, например, наблюдение электронно-колебательной системы N_3V-дефектов в наносекундном временном диапазоне [27*, 29*] и ее отсутствие в спектрах люминесценции, регистрируемых с задержкой в 1 мкс после импульса возбуждения [30*]; скачкообразное увеличение амплитуды и длительности

токовых импульсов при развитии лазерно-стимулированного электрического пробоя межэлектродного зазора алмазного коммутатора [8*, 9*, 11*]; 2) воспроизводимостью полученных данных в пределах интервала 15% в одинаковых условиях для различных образцов; 3) согласием полученных экспериментальных данных с результатами численных оценок, например, при облучении лазерным излучением металлических пленок на диэлектрических подложках в адгезионном режиме разрушении максимальная расчетная температура не превышает температуру плавления для объемного материала; оценочные концентрации азотной примеси в образцах, полученные из спектров оптического пропускания, согласуются с величинами при численном моделировании зависимостей амплитуды фототока от приложенного электрического поля и интенсивности излучения.

Новизна полученных результатов:

1. Исследованы спектрально-кинетические характеристики с временным разрешением 10 нс фото- и катодолюминесценции природных и синтетических алмазов при импульсном возбуждении. Исследована трансформация спектров люминесценции алмазов с течением времени после импульса возбуждения. Впервые получены спектры времени затухания фото- и катодолюминесценции природных и синтетических алмазов [2007].
2. Обнаружен адгезионный механизм разрушения тонких металлических пленок на неметаллических подложках при облучении лазерным излучением [2002]. Показано, что при лазерном облучении металлической пленки сквозь прозрачную подложку пороговая плотность энергии излучения для разрушения пленки меньше, чем пороговая плотность энергии для адгезионного разрушения при прямом облучении пленки.
3. Показано, что лазерно-стимулированный пробой межэлектродной поверхности оптоэлектронного алмазного коммутатора с поперечной геометрией при высоких напряженностях поля и/или плотностях энергии лазерного излучения вызывает аномальное увеличение амплитуды и/или длительности токового импульса коммутатора [2004].
4. Показано, что в алмазных оптоэлектронных коммутаторах с продольной геометрией при управлении излучением в области несобственного (на дефектах и примесях) поглощения эффект уменьшения амплитуды токового сигнала за счет накопления объемного заряда на глубоких ловушках в запрещенной зоне алмаза преодолевается при смене полярности потенциала с каждым управляющим импульсом [2004].

Научная ценность:

1. На основе изменения спектров фото- и катодолюминесценции природных алмазов разделены во времени электронно-колебательная система

N_3V-дефектов, доминирующая в наносекундном временном диапазоне, и бесструктурная А-полоса люминесценции алмаза, доминирующая в миллисекундном временном диапазоне. В спектрах времени затухания электронно-колебательной системы N_3V-дефектов наблюдались всплески в локальных областях бесфононной линии λ = 415.2 нм и ее фононных повторений в спектральной области 420–460 нм.

2. Продемонстрирован адгезионный механизм разрушения тонких металлических пленок (~ 1 мкм) на неметаллических подложках при облучении лазерным излучением без возникновения расплава за счет лазерно-индуцированных термических напряжений. Показано уменьшение порога плотности энергии для разрушения пленки по адгезионному механизму при облучении пленки сквозь прозрачную подложку за счет дополнительного влияния ударного воздействия лазерного излучения.

3. Установлена ошибочность принятой интерпретации (оптоэлектронная неустойчивость) аномального увеличения амплитуды и/или длительности токового импульса алмазного коммутатора при высоких напряженностях поля и/или плотностях энергии лазерного излучения. Данный эффект и «линейность» вольтамперной характеристики объясняются лазерно-стимулированным пробоем межэлектродной поверхности коммутатора.

Практическая значимость:

1. Продемонстрировано, что природный и ХПО алмаз, а также основной имитатор алмаза – фианит (стабилизированный диоксид циркония) – характеризуются различными спектрами оптического пропускания и люминесценции, ввиду оптических центров с различной природой, спектральными и временными характеристиками.

2. Продемонстрирована работа оптоэлектронных алмазных коммутаторов с продольной и поперечной геометрией с высокой эффективностью переключения η при управлении лазерным излучением на 222, 248 и 308 нм (η до 0.65), широкополосным импульсным излучением в диапазоне 200–250 нм (η до 0.1) и электронными пучками нано- и пикосекундной длительности (η до 0.95).

3. Определены механизмы, ограничивающие эффективную работу алмазных оптоэлектронных коммутаторов. Для коммутаторов с поперечной геометрией – это лазерно-стимулированный пробой межэлектродной поверхности. Для коммутаторов с продольной геометрией – это накопление объемного заряда на ловушечных уровнях в запрещенной зоне. Предложены способы преодоления данных ограничивающих механизмов.

Внедрение результатов и предложения по их использованию:

1. Предложен способ экспресс-идентификации природного и ХПО алмаза и его материалов-имитаторов на основе измерения интегральных спектров оптического пропускания и фотолюминесценции.
2. Предложен способ экспресс-оценки величины силы адгезии металлических и керамических пленок к неметаллическим подложкам путем определения пороговой плотности энергии лазерного излучения необходимой для адгезионного разрушения пленки.
3. Предложено для управления алмазными высоковольтными коммутаторами использовать источник УФ излучения, основанный на микросекундном искровом разряде в ксеноне (грант CRDF № RP2-538-TO-02 «УФ Хе лампы с высокой плотностью мощности излучения для коммутаторов на основе алмаза», 2002–2004 г., договор с Alameda Applied Science Corp, Сан Леандро, США).
4. Предложена концепция алмазного оптоэлектронного коммутатора высоких мощностей и напряжений для приложений сильноточной электроники.

Апробация работы:

- 5-й Международный Российско-Китайский Симпозиум по лазерной физике и лазерным технологиям, Томск, Россия (2000 г.);
- Международная конференция Lasers 2000, Albuquerque, USA (2000 г.);
- Школы-семинара молодых ученых «Современные проблемы физики и технологии», Томск, Россия (2001 г.);
- Международная конференция Atomic and Molecular Pulsed Lasers V, Томск, Россия (2001 г.);
- Международная конференция High-power laser ablation IV, Taos, USA (2002 г.);
- Международный симпозиум Symposium on the Physics of Ionized Gases «21st SPIG», Ниш, Югославия (2002 г.);
- 6-я Международная конференция Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, Томск, Россия (2002 г.);
- 8-я Международная школа-семинар по люминесценции и лазерной физике, Иркутск, Россия (2002 г.);
- Международная конференция Atomic and Molecular Pulsed Lasers VI, Томск, Россия (2003 г.);
- 13-й Международный симпозиум High current electronics, Томск, Россия (2004 г.);
- 7-й Международный Российско-Китайский Симпозиум по лазерной физике и лазерным технологиям, Томск, Россия (2004 г.);

- Международная конференция ICONO/LAT 2005, Санкт-Петербург, Россия (2005 г.);
- Международная конференция Atomic and Molecular Pulsed Lasers VII, Томск, Россия (2005 г.);
- 13-я Международная конференция Radiation Physics and Chemistry of Inorganic Materials, Томск, Россия (2006 г.);
- Международная конференция Atomic and Molecular Pulsed Lasers VIII, Томск, Россия (2007 г.);
- 9-я Международная конференция Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, Томск, Россия (2008 г.);
- Международная конференция Atomic and Molecular Pulsed Lasers IX, Томск, Россия (2009 г.);
- XVIII Международный симпозиум Gas Flow and Chemical Lasers and High Power Lasers, София, Болгария (2010 г.).

Личный вклад. Все результаты диссертации получены лично автором, либо при его прямом участии. При его непосредственном участии были проведены постановка, подготовка и выполнение экспериментов, а также обработка и интерпретация результатов экспериментов. Часть экспериментов по исследованию катодолюминесценции алмазных образцов были проведены на лабораторной базе Кафедры лазерной и световой техники ТПУ на установке и при участии доцента, к.ф.-м.н. *О.И. Олешко* (**глава 3**). На основании полученных экспериментальных данных при участии н.с., к.ф.-м.н. *А.В. Феденева* был проведен расчет максимальной температуры тонкой металлической пленки на неметаллической прозрачной подложке при воздействии лазерным излучением (**глава 4**). Часть экспериментов и математического моделирования протекания фототока в алмазных образцах были проведены в Alameda Applied Science Corp. (Сан Леандро, США) при участии *J. Schein*, *M. Krishnan* (**глава 5**).

Постановка задачи и общее руководство работой осуществлялось профессором, д.ф.-м.н. (специальность 01.04.03 – радиофизика) В.Ф. Тарасенко.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 159 листах машинописного текста, иллюстрируется 89 рисунками, 9 таблицами, состоит из Введения, пяти глав, Заключения и списка литературы из 137 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы задачи исследований, приведены защищаемые положения, их новизна, научная и практическая ценность.

В первой главе дан обзор научной литературы, посвященной явлению обратимого изменения проводимости недопированного (малопримесного) алмаза природного и синтетического происхождения; оптоэлектронным приборам создаваемым на основе алмаза; достигнутым параметрам работы алмазных оптоэлектронных коммутаторов в зависимости от способа и характеристик управления, конфигурации коммутатора; ограничениям широкого применения данных оптоэлектронных приборов и способам их преодоления.

В п. 1.1 описаны оптические и электронные свойства алмаза, определяющие его применение в качестве материала – основы оптоэлектронных приборов. В п. 1.1.1 описаны основные способы синтеза алмазов, включая природный. В п. 1.1.2 приведена классическая классификация алмазов по типам на основе спектров оптического пропускания. П. 1.1.3 посвящен основным дефектам в алмазах, которые определяют их оптические и электрические свойства. В п. 1.1.4 описываются материалы и способы формирования электрических контактов к алмазным образцам, стойкости (контактов) к управляющему воздействию и их электрическим характеристикам.

В п. 1.2 приведена классификация оптоэлектронных приборов на основе алмаза, их рабочие характеристики и области применения. В п. 1.2.1 описаны перспективные светоизлучающие полупроводниковые приборы – алмазные светодиоды, излучающие в спектральной области радиационной рекомбинации свободных экситонов на длине волны 235 нм. В п. 1.2.2 сообщается об активных и пассивных алмазных приборах СВЧ-диапазона, управляемых оптическим излучением. П. 1.2.3 посвящен алмазным фотодетекторам УФ и видимого диапазонов, один из типов которых – алмазные фоторезисторы – фактически являются оптоэлектронными коммутаторами при умеренных напряженностях электрического поля (до 1 кВ/см). В п. 1.2.4 описаны собственно алмазные оптоэлектронные коммутаторы, дана оценка развития алмазных оптоэлектронных коммутаторов высоких мощностей и напряжений, приведены типы управления, характерные конструкции и достигнутые рабочие параметры.

Во второй главе дано описание исследованных образцов (п. 2.1), экспериментальной аппаратуры и методик (п. 2.2), с помощью которых были получены экспериментальные данные, помещенные в оригинальной части диссертационной работы. Пункт 2.3 посвящен вопросу обработки результатов измерений.

Третья глава посвящена исследованию спектральных оптических характеристик алмазных образцов и образцов из материалов, способных имитировать алмаз. Исследовались спектры оптического пропускания, фото- и катодолюминесценции образцов. Проведены оценки концентрации основных азотных дефектов в алмазных образцах.

В п. 3.1 описаны исследования оптической спектроскопии образцов. На основании измеренных спектров оптического пропускания образцов в диапазоне 200–850 нм и литературных данных по дисперсии показателя преломления алмаза, фианита, циркона и рубина методом дихотомии были рассчитаны спектры поглощения образцов согласно выражениям:

$$T(\lambda) = \frac{\left(1 - r(\lambda)\right)^2 \cdot e^{-\alpha(\lambda)\cdot d}}{\left(1 - r(\lambda)^2 \cdot e^{-2\cdot\alpha(\lambda)\cdot d}\right)}, \quad (3)$$

$$r(\lambda) = \frac{\left(1 - n(\lambda)\right)^2}{\left(1 + n(\lambda)\right)^2}, \quad (4)$$

где $T(\lambda)$ – измеренный спектр пропускания, $r(\lambda)$ – коэффициент отражения, $\alpha(\lambda)$ – коэффициент поглощения [см$^{-1}$], d – оптическая толщина образца, $n(\lambda)$ – показатель преломления.

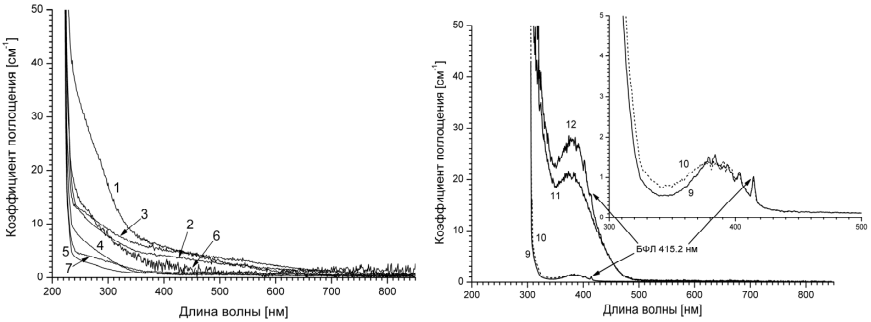
Спектры оптического поглощения алмазных плоскопараллельных образцов (рис. 1, *а*) показали край фундаментального поглощения при 225 нм, плавное уменьшение коэффициента поглощения в видимую область и отсутствие каких-либо узкополосных особенностей. Спектры оптического поглощения ограненных (рис. 1, *б*) образцов продемонстрировали вторичный край поглощения при 310 нм и электронно-колебательную систему поглощения N_3V-дефектов с бесфоннонной линией (БФЛ) при 415.2 нм и фононными повторениями в спектральной области 350-410 нм.

На основании спектров пропускания с помощью эмпирических выражений [5*] были произведены оценки концентраций основных азотосодержащих дефектов в алмазе.

Взаимозависимости (рис. 2) концентраций азотосодержащих дефектов N_s, N_2, N_3V и N_4V (известных также, как *C*-, *A*-, *N3*- и *B1*-центры, соответственно [5*, 7*, 14*]) показали хорошую корреляцию для N_s, N_2, и N_4V-дефектов, но гораздо худшую между N_3V-дефектами и остальными.

Поскольку естественный или ВДВТ отжиг алмазов приводит к агломерации N_s- в N_2-, и далее в N_4V-дефекты [30*], то между этими дефектами наблюдается хорошая корреляция с коэффициентом R в интервале 0.97–0.99. В процессе агломерации азота N_3V-дефекты образуются в побочной реакции [31*], поэтому корреляция их концентрации с концентрацией N_s-, N_2- и N_4V-дефектов значительно хуже ($R \div$ 0.62–0.87). Проведенная оценка концентрации основных азотосодержащих дефектов позволяет получать качественную картину их состава в образце.

П. 3.2 посвящен исследованию фотолюминесценции алмазных образцов. В п. 3.2.1 дано обоснование выбора длины волны возбуждения для эффективной фотолюминесценции.



а *б*

Рис. 1. Спектры поглощения алмазных образцов, рассчитанные по формулам (3),(4). Спектры обозначены согласно номерам образцов. 1–4,7 – природные плоскопараллельные образцы, 5, 6 – синтетические плоскопараллельные, 9–12 – природные с «круглой» огранкой

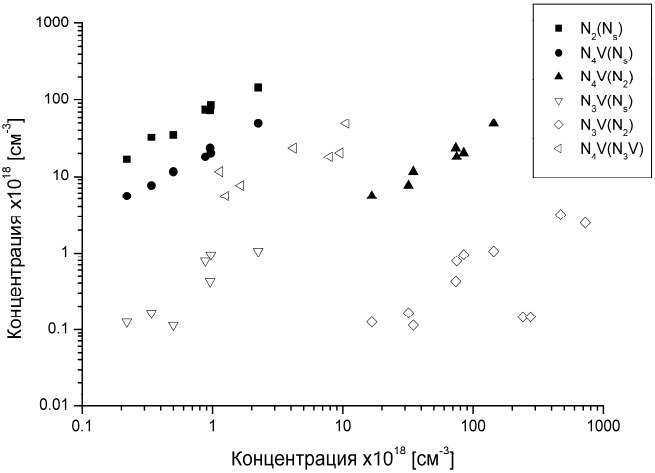


Рис. 2. Корреляции между оценочными концентрациями основных азотных дефектов в алмазных образцах

В п. 3.2.3 описаны результаты измерений спектров фотолюминесценции природного (рис. 3, *а*) и синтетического (рис. 3, *б*) алмазных образцов при возбуждении лазерным излучением на 222 нм, отмечены особенности, характерные каждой из этих групп образцов.

Природные алмазы 2а типа обычно демонстрируют бесструктурную *А*-полосу в области 350–700 нм [5*, 7*, 14*, 27*], на которую могут быть наложены электронно-колебательные системы различных центров люминесценции [5*, 7*, 14*]. В данном случае (рис. 3, *а*), это электронно-

колебательная система *N3* с БФЛ 415.2 нм и фононными повторениями в области 420–460 нм.

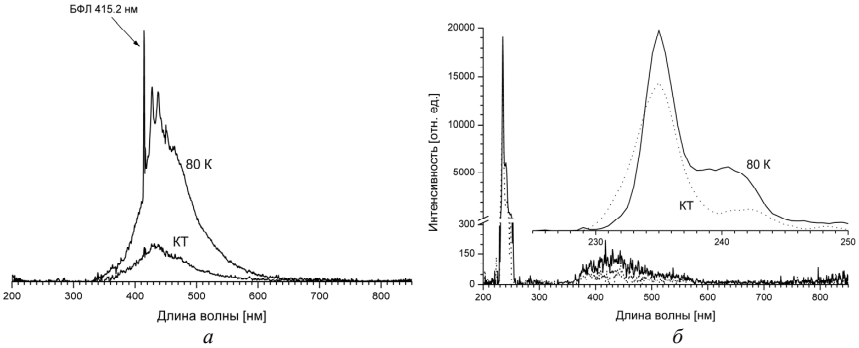


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции природного 4 (*а*) и синтетического 5 (*б*) алмазных образцов при комнатной температуре (КТ) и охлаждении жидким азотом (80 К). Возбуждение фотолюминесценции производилось KrCl-лазером с длительностью импульса 10 нс полувысоте и интенсивности на поверхности образца 0.5 МВт/см^2

Синтетические алмазы, полученные ХПО-методом, также как и природные алмазы демонстрируют А-полосу люминесценции. При высоком качестве образца (концентрация дефектов менее 10^{17} см$^{-3}$) в спектрах фотолюминесценции синтетических образцов наблюдается линия излучательной рекомбинации свободных экситонов с максимумом при 235 нм [32*, 33*] (см. рис. 3, *б*). Интенсивность А-полосы в спектрах люминесценции ХПО-образцов 5 и 6 была на 2 порядка меньше интенсивности полосы свободных экситонов.

Охлаждение образцов жидким азотом вызывало увеличение интенсивности люминесценции как природных, так и синтетических образцов. Для природных образцов увеличение интенсивности БФЛ на 415.2 нм составляло ~15 раз, ее фононных повторений ~7 раз, а интенсивности *А*-полосы в ~5 раз. Для синтетических ХПО-образцов увеличение интенсивности для *А*-полосы составило ~1.7 раз, линии свободных экситонов – ~1.4 раз. По-видимому, в природных образцах имеет место передача возбуждения от примесных центров люминесценции системы *N3* к центрам *А*-полосы люминесценции.

Исследование спектров свечения и кинетики затухания люминесценции природных и синтетических алмазных образцов при возбуждении электронными пучками длительностью от 0.1 до 10 нс представлено в п. 3.3.

Спектры импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) природных и синтетических алмазных образцов соответствовали спектрам

фотолюминесценции. Спектры ИКЛ синтетических образцов не изменялись с течением времени после импульса электронного пучка. Спектры ИКЛ природных образцов претерпевали существенные изменения в течение 2 мс после импульса электронного пучка (рис. 4).

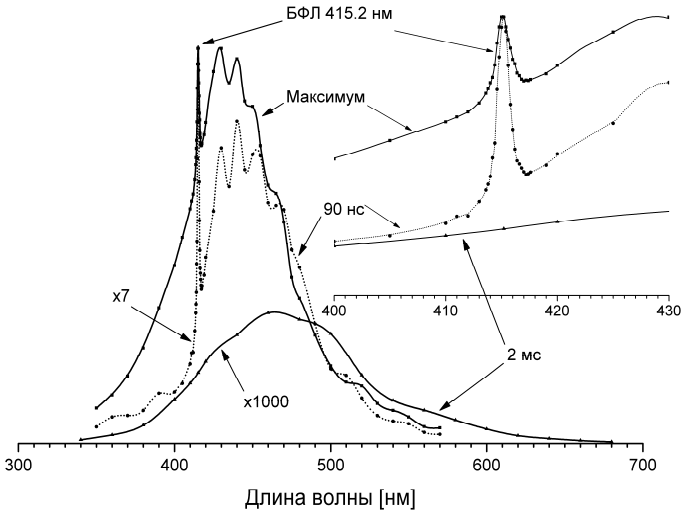


Рис. 4. Изменение во времени спектра ИКЛ природного плоскопараллельного алмазного образца 4 при возбуждении электронным пучком длительностью 10 нс при комнатной температуре в максимуме сигнала свечения, спустя 90 нс и 2 мс после импульса электронного пучка. Спектры спустя 90 нс и 2 мс увеличены для удобства сравнения. В спектре спустя 2 мс после импульса система N3 с БФЛ 415.2 нм не наблюдается

Спектр, восстановленный по максимумам импульсов свечения, продемонстрировал наличие *A*-полосы и системы *N3*, как и для интегральных спектров. Однако к 2 мс после импульса электронного пучка происходило полное исчезновение системы *N3*, и в спектре наблюдалась только *A*-полоса. Абсолютная величина интенсивности свечения снижалась на 3 порядка к 2 мс после импульса электронного пучка.

Исследование кинетики затухания импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) природных алмазных образцов (рис. 5) продемонстрировало неизменное время затухания люминесценции в спектральной области 370–600 нм в миллисекундном временном диапазоне. За пределами спектрального диапазона 370–600 нм время затухания ИКЛ резко уменьшалось.

В наносекундном временном диапазоне характер спектральной зависимости времени затухания соответствовал спектру ИКЛ: в области БФЛ

415.2 нм наблюдался резкий всплеск времени затухания; на участках спектра, соответствующих фононным повторениям БФЛ также наблюдались локальные максимумы времени затухания. За пределами спектральной области 400–500 нм время затухания ИКЛ резко уменьшалось.

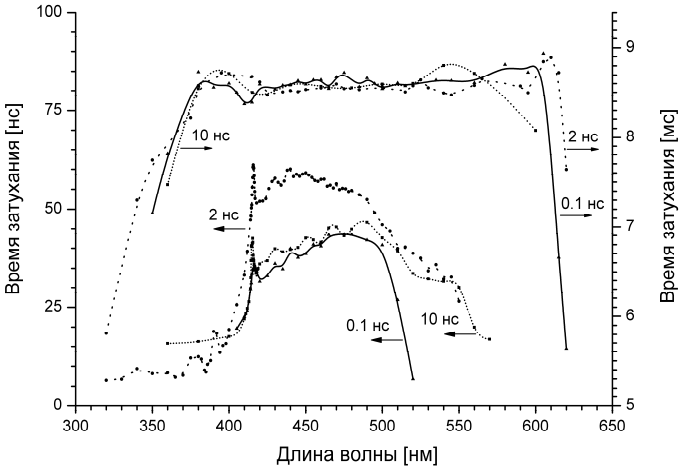


Рис. 5. Спектры времени затухания ИКЛ природного плоскопараллельного алмазного образца 4 при возбуждении электронными пучками длительностью 0.1, 2 и 10 нс при комнатной температуре в нано- и миллисекундном диапазонах. В области БФЛ 415.2 нм и ее фононных повторений наблюдается всплеск времени релаксации ИКЛ

В п. 3.4 продемонстрирована методика экспресс-идентификации алмазных образцов и образцов из материалов-имитаторов алмаза с помощью измерения спектров оптического пропускания и фотолюминесценции образцов. Совокупность этих данных позволяет идентифицировать алмаз среди его имитаторов, а также определить способ синтеза алмазного образца. В п. 3.4.1 представлена проблема имитаторов ювелирных алмазов. Неалмазные образцы из материалов, способных имитировать алмаз, описаны в п. 3.4.2.

В п. 3.4.3 описан собственно метод экспресс-идентификации алмазов и их имитаторов с помощью измерения спектров оптического пропускания и фотолюминесценции.

В п. 3.5 представлены выводы к главе 3.

В **четвертой главе** приведены результаты исследований стойкости к лазерному излучению металлических и керамических пленок толщиной 0.3–2 мкм на подложках из стекла, кварца и алмаза при воздействии как со стороны границы воздух-пленка (прямое воздействие), так и со стороны

подложка-пленка (инверсное воздействие). При этом экспериментальным путем определены величины пороговых интенсивностей и плотностей энергии лазерного излучения для нарушения адгезии покрытия к подложке.

В п. 4.1 приведены результаты исследования характера разрушения поверхности ниобиевой пленки толщиной ~1 мкм на стеклянной подложке мощным лазерным излучением (Хе-лазер, 1.73 мкм, 400 нс, 5 Дж). Ввиду неоднородного распределения плотности энергии по площади выходной апертуры лазера по мере удаления от центра автографа наблюдались четыре области: 1) область полного выноса пленки на подложке покрытой трещинами; 2) область вплавленных в подложку металлических капель; 3) область оплавленной пленки; 4) область пленки покрытой трещинами и отслоившейся от подложки. Соотношение радиального размера центральной области апертуры лазерного пучка с максимальной плотности энергии и области спада плотности энергии пропорционально соотношению радиальных размеров области 1) и областей 2)–4) автографа излучения на поверхности пленки.

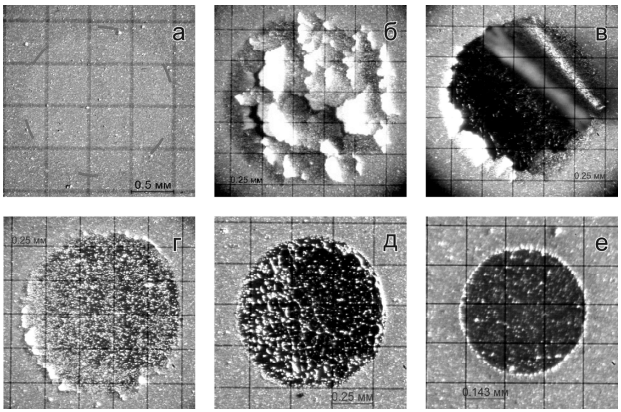


Рис. 6. Микрофотографии автографа лазерного импульса (XeCl-лазер, 308 нм, 20 нс) на поверхности пленки нержавеющей стали толщиной ~1 мкм на стеклянной подложке для различных плотностей энергии лазерного излучения: (а)–(е) – плотность энергии E = 0.44, 1.06, 1.26, 1.58, 2.7, 9.5 Дж/см^2

В п. 4.2 при воздействии лазерным излучением (XeCl-лазер, 308 нм, 20 нс, 150 мДж) на поверхность пленки нержавеющей стали толщиной ~1 мкм на стеклянной подложке изменение плотности энергии излучения на поверхности вызывало изменения характера разрушения пленки (рис. 6): отслоение/растрескивание, плавление, испарение. Режим отслоения/растрескивания наблюдался при «прямом» облучении для пленок

из различных материалов (нержавеющая сталь, ниобий, титан, цирконий, нитрид титана). Для медной пленки режим отслоения/растрескивания наблюдался при «инверсном» облучении сквозь кварцевую или алмазную подложки, но никогда при «прямом» облучении.

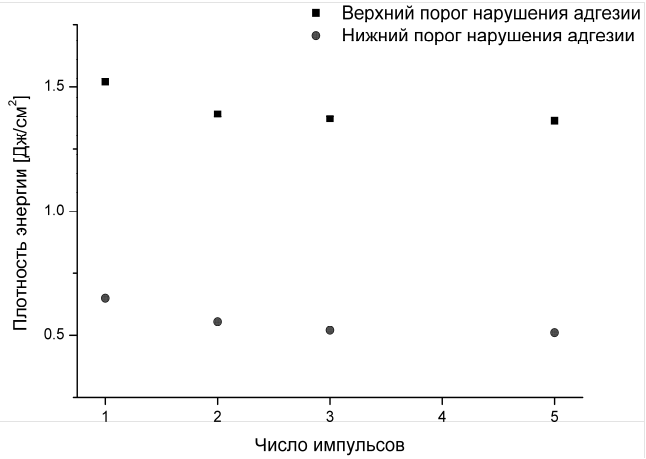


Рис. 7. Зависимости верхнего и нижнего порогов плотности энергии лазерного излучения для адгезионного режима разрушения пленки из нержавеющей стали ~1 мкм на стеклянной подложке от числа лазерных импульсов (XeCl-лазер, 308 нм, 20 нс, 150 мДж)

Накопление лазерных импульсов (несколько импульсов с частотой повторения 1 Гц) приводило к уменьшению верхнего и нижнего порогов плотности энергии лазерного излучения для отслоения/растрескивания пленки из нержавеющей стали (рис. 7) и циркония (по-видимому, и для других пленок).

Было сделано предположение, что в основе эффекта отслоения/растрескивания пленки при воздействии лазерным излучением лежит отрыв пленки от подложки в результате лазерно-индуцированных термических напряжений при расширении нагретой области пленки – адгезионный механизм разрушения. Образование трещин на поверхности отслоившейся пленки происходит за счет релаксации температурных напряжений при остывании пленки. Порог плотности энергии лазерного излучения для адгезионного разрушения пленок для всех металлов был существенно (более чем на порядок) ниже, чем порог классической лазерной абляции наносекундного диапазона [37*, 38*].

В п. 4.3 приведены результаты расчетов величины лазерно-индуцированных напряжений для различных пленок на неметаллических

подложках при воздействии лазерным излучением на основе расчетных значений максимальной температуры (на основе решения уравнения теплопроводности) в сравнении с измеренной величиной силы адгезии данных пленок к подложкам методом «скрэтч-теста».

Для адгезионного режима разрушения пленок расчетные значения лазерно-индуцированных термических напряжений в пленке составили от 10 до 76% от измеренных величин силы адгезии данных пленок к подложкам. Кроме того, расчетные значения температуры на поверхности пленок при плотностях энергии излучения, при которых начинают наблюдаться плавление и испарение пленок согласуются с величинами температур плавления и испарения объемных материалов. Предложено, что локальные неоднородности силы адгезии, абсолютная величина которой может быть меньше усредненной (измеренной), вызывают локальные отслоения пленки подложки при уровне лазерно-индуцированных напряжений меньших измеренной силы адгезии. При «инверсном» облучении дополнительным механизмом усиления влияния лазерно-индуцированных напряжений может выступать возникновение интерференционных картин на границе пленка-подложка за счет наличия неоднородностей в подложке.

Высказана рекомендация: при геометрии алмазного оптоэлектронного коммутатора с «инверсным» облучением электродов не превышать плотность энергии излучения для адгезионного разрушения напыленного электрода. В п. 4.4 представлены выводы к главе 4.

Пятая глава посвящена собственно исследованию оптоэлектронного переключения в алмазных образцах, управляемого лазерным излучением и электронными пучками различной длительности и энергии, улучшению рабочих параметров алмазных оптоэлектронных коммутаторов с различной геометрией и различными материалами электродов.

В п. 5.1 указаны основные характеристики алмазных оптоэлектронных коммутаторов. Основным рабочим параметром коммутатора является эффективность переключения, определяемая сопротивлением в открытой фазе. Для коммутатора на основе фотопроводника управляемого световым импульсом эффективность переключения записывается как:

$$\eta = \frac{U_{\text{макс}}}{U_0} = \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{мин}} + R_{\text{н}}}, \qquad (5)$$

где $U_{\text{макс}}$ – амплитуда напряжения, измеряемая на нагрузке, U_0 – коммутируемое напряжение, $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки, $R_{\text{мин}}$ – минимальное сопротивление коммутатора.

Согласно [5*] сопротивление фотопроводника без учета влияния контактов записывается в виде:

$$R = \frac{l}{e \cdot n(I) \cdot \mu(n, U_0) \cdot S}, \qquad (6)$$

где l и S – длина и площадь сечения фотопроводника, e – элементарный заряд, $n(I)$ и $\mu(n, U_0)$ – концентрация и подвижность фотоносителей, I – интенсивность управляющего излучения.

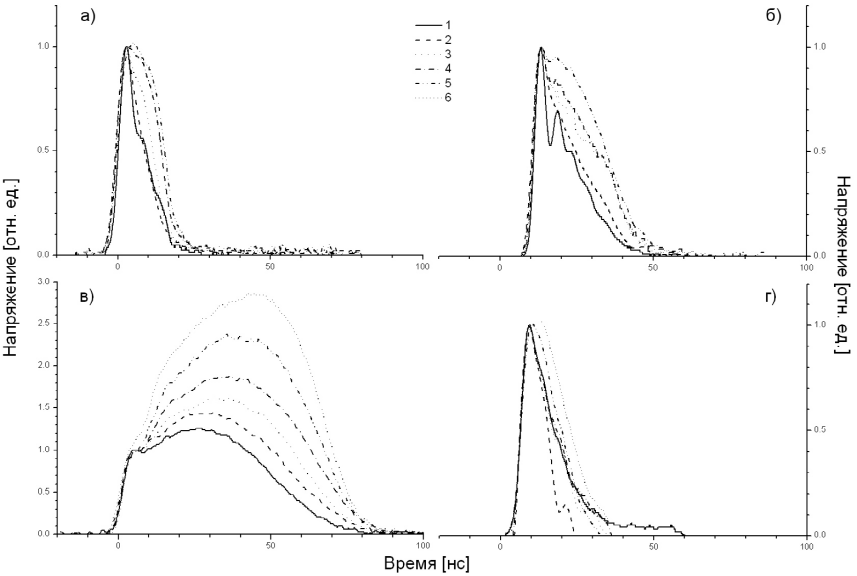


Рис. 8. Импульсы управляющего лазерного излучения (непрерывные кривые, **1**) и токовые импульсы алмазных коммутаторов (штрих-пунктирные кривые, **2**–**6**). **а**) коммутатор № 3, управляемый лазерным излучением λ = 222 нм длительностью $\tau_{0.5}$ = 7 нс по полувысоте с пиковой интенсивностью $I_и$ = **2**) 0.13 МВт/см^2, **3**) 0.35 МВт/см^2, **4**) 2.23 МВт/см^2, **5**) 5.88 МВт/см^2; **б**) № 5, λ = 248 нм, $\tau_{0.5}$ = 12 нс, $I_и$ = **2**) 0.06 МВт/см^2, **3**) 0.14 МВт/см^2, **4**) 0.23 МВт/см^2, **5**) 4.45 МВт/см^2; **в**) № 4, λ = 308 нм, $\tau_{0.5}$ = 49 нс, $I_и$ = **2**) 0.04 МВт/см^2, **3**) 0.15 МВт/см^2, **4**) 0.25 МВт/см^2, **5**) 0.38 МВт/см^2, **6**) 0.65 МВт/см^2; **г**) № 1, λ = 353 нм, $\tau_{0.5}$ = 10 нс, $I_и$ = **2**) 0.01 МВт/см^2, **3**) 0.04 МВт/см^2, **4**) 0.06 МВт/см^2, **5**) 0.32 МВт/см^2, **6**) 0.61 МВт/см^2

В п. 5.2 описана работа алмазных оптоэлектронных коммутаторов в режиме фотодетектора, т.е. в условиях умеренных интенсивностей лазерного излучения (до 6 МВт/см^2) и приложенных электрических полях (до 3 кВ/см). На рис. 8 представлены импульсы напряжения на нагрузке алмазных оптоэлектронных коммутаторов, работающих в режиме фотодетекторов лазерного излучения для длин волн 222, 248, 308 и 353 нм (п. 5.2.1). Отмечено искажение заднего фронта импульсов напряжения

алмазных коммутаторов при увеличении интенсивности лазерного излучения свыше 0.1–0.3 МВт/см^2. Данный эффект ограничивает по интенсивности линейный режим работы алмазных коммутаторов в качестве фотодетекторов. Предположено, что увеличение вклада заднего фронта в суммарный импульс напряжения алмазных коммутаторов наблюдается за счет процессов освобождения носителей заряда, захваченных на ловушечные уровни. По напряжению линейный режим работы алмазных коммутаторов ограничен напряженностями поля ~ 1 кВ/см – величины поля меньше которой эффект уменьшения подвижности носителей заряда с ростом приложенного поля слабо выражен [5*]. Спектральная чувствительность алмазных коммутаторов убывала экспоненциально с ростом длины волны лазерного излучения.

В п. 5.3 исследованы зависимости фотопроводимости и эффективности переключения оптоэлектронных коммутаторов на основе природных алмазов с медными и многослойными (Ti/Pt/Au) электродами в зависимости от интенсивности управляющего излучения и электрического поля (рис. 9), приложенного к образцам. Коммутаторы имели поперечную геометрию при которой приложенное поле было ортогонально управляющему излучению. Алмазный образец представлял собой параллелепипед с металлизированными противоположными гранями. При этом полностью облучалась одна из поверхностей образца между напыленными электродами (далее, межэлектродная поверхность).

В таких условиях эффективность переключения была максимальна при длине волны управляющего излучения на 222 нм, поскольку равномерная засветка межэлектродной поверхности в сочетании с большим коэффициентом поглощения (α ~ 360 см$^{-1}$) обеспечивали полное поглощение управляющего излучения и высокую концентрацию носителей заряда (до 10^{14} см$^{-3}$). На длине волны 308 нм эффективность переключения была значительно ниже, т.к. существенно меньший коэффициент поглощения (коммутатор № 2, α ~ 7 см$^{-1}$) приводит к поглощению только 13% управляющего излучения.

Согласно выражениям (5) и (6) с ростом приложенного поля эффективность переключения должна уменьшаться ввиду уменьшения подвижности носителей заряда, что наблюдается в большинстве случаев (п. 5.4). Однако на рис. 9 для длины волны 222 нм коммутатор № 3 показал противоположную тенденцию – увеличение приложенного поля приводило к увеличению эффективности переключения, что явно противоречит выражениям (5) и (6). Исследования показали, что в зависимости от длины волны при определенных соотношениях приложенного поля и плотности энергии управляющего (рис. 9) излучения в случае освещения межэлектродной поверхности развивается лазерно-стимулированный

поверхностный пробой, который проявляется в искажении формы и резком увеличении амплитуды токового импульса. Лазерно-стимулированный поверхностный пробой ограничивает рабочие характеристики оптоэлектронных коммутаторов с данной геометрией.

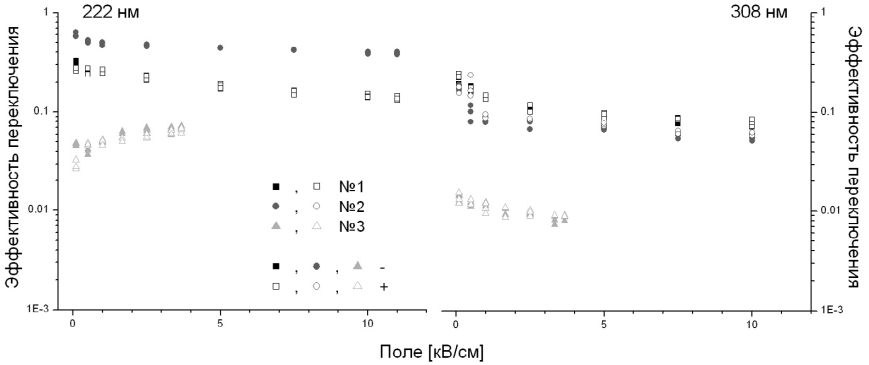


Рис. 9. Эффективность переключения оптоэлектронных коммутаторов на основе природных алмазов с Ti/Pt/Au (коммутаторы № 1 и № 2) и медными (коммутатор № 3) электродами в зависимости от приложенного электрического поля отрицательной и положительной полярностей для управляющего излучения с пиковой интенсивностью 1 МВт/см^2 на 222 нм и 308 нм с длительностями импульсов 9 и 20 нс по полувысоте, соответственно

Развитие лазерно-стимулированного пробоя можно исключить, если использовать продольную геометрию коммутатора, при которой приложенное электрическое поле параллельно управляющему излучению. При этом образец представляет собой плоскопараллельную пластину, на одну грань напылен сплошной электрод, на другую – тонкий, сетчатый или полупрозрачный. При этом сплошной электрод подвергается «инверсному» облучению (как описано в главе 4), что ограничивает в случае медных электродов плотность энергии управляющего излучения менее 0.28 Дж/см^2. Для предотвращения развития лазерно-стимулированного пробоя перед коммутатором устанавливалась диафрагма, которая препятствовала засветке всей межэлектродной поверхности.

При продольной геометрии излучение на 222 нм поглощается по уровню 0.1 в слое алмаза толщиной ~ 160 мкм. Поэтому для коммутаторов № 4 и № 5 (толщиной 0.25 и 0.5, соответственно) для управляющего излучения на 222 нм получены худшие рабочие характеристики алмазных коммутаторов (рис. 10). Лучшие характеристики получены для длины волны 248 нм и немного уступающие им для 308 нм.

При управлении лазерным излучением коммутаторами с поперечной геометрией максимальная эффективность переключения η = 0.64 была

достигнута на длине волны 222 нм, а для коммутаторов с продольной геометрией – η = 0.45 на длине волны 248 нм.

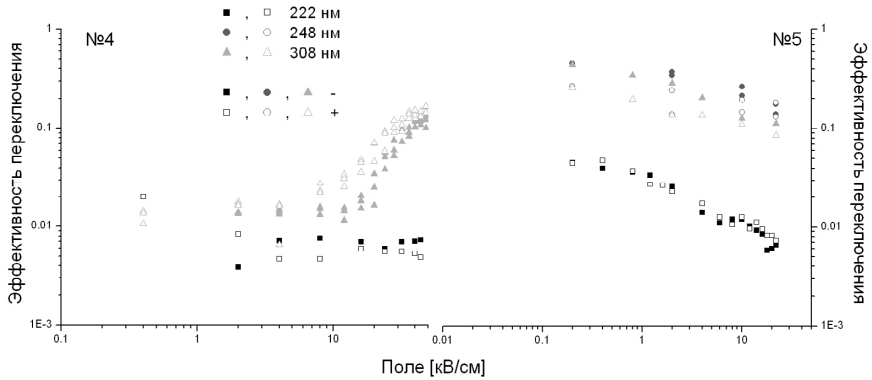


Рис. 10. Эффективность переключения оптоэлектронных коммутаторов на основе природного алмаза с медными электродами (коммутатор № 4) и синтетического алмаза с Ti/Pt/Au электродами (коммутатор № 5) в зависимости от приложенного электрического поля отрицательной и положительной полярностей для управляющего излучения с пиковой интенсивностью 1.5 МВт/см^2 на 222 нм, 248 и 308 нм с длительностями импульсов 9, 12 и 20 нс по полувысоте, соответственно

При управлении алмазными коммутаторами сильноточным электронным пучком от ускорителя на основе отпаянного диода достигнута максимальная эффективность переключения η = 0.95. В случае субнаносекундного электронного пучка от ускорителя на основе газонаполненного диода максимальная эффективность переключения составила η = 0.24 (рис. 11).

Использование лазеров и ускорителей электронов для управления нецелесообразно, когда необходимо снизить массо-габаритные параметры оптоэлектронного алмазного коммутатора. Для этих целей в качестве источника управляющего излучения была выбрана импульсная ксеноновая лампа, которая обеспечивает интенсивность до 100 кВт/см^2 излучения в области 200–250 нм с длительностью несколько микросекунд. При этом обеспечивается равномерное возбуждение всего объема коммутатора. В таких условиях была получена эффективность переключения η = 0.08 для образца № 2 с поперечной геометрией.

В п. 5.5 приведены результаты моделирования оптоэлектронного переключения алмазных коммутаторов с поперечной геометрией для длин волн управляющего излучения 222, 308, 337 и 353 нм. Получено удовлетворительное согласие расчетных зависимостей амплитуды фототока

через алмазный коммутатор в зависимости от интенсивности управляющего излучения с экспериментальными данными.

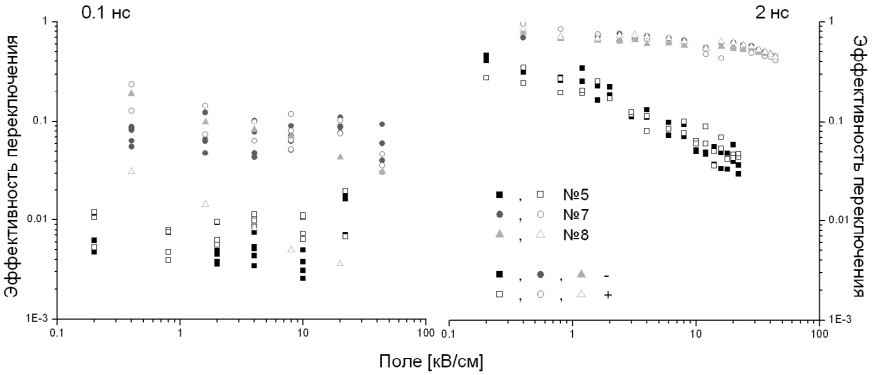


Рис. 11. Эффективность переключения оптоэлектронных коммутаторов на основе синтетического алмаза (№ 5) и природных алмазов (№ 7, 8) с Ti/Pt/Au электродами в зависимости от приложенного электрического поля отрицательной и положительной полярностей для управляющих электронных пучков длительностями импульсов 0.1 и 2 нс по полувысоте и плотностями токов 40 и 200 А/см^2, соответственно

В п. 5.6 обсуждаются методы снижения вклада факторов, ограничивающих работу алмазных коммутаторов. Для коммутаторов с поперечной геометрией – это лазерно-стимулированный электрический пробой межэлектродной поверхности. Для предотвращения развития лазерно-стимулированного пробоя необходимо избежать облучения всей межэлектродной поверхности, увеличить ее протяженность, а также размещать контакты под облучаемой поверхностью. Для коммутаторов с продольной геометрией – это накопление объемного заряда, захваченных ловушками носителей заряда. При управлении алмазным коммутатором излучением в области несобственного (примесного/дефектного) поглощения алмаза (длина волны более 226 нм) эффект накопления объемного заряда замедляется чередованием полярности приложенного напряжения с каждым управляющим импульсом, как показано на рис. 12.

В п. 5.7 предложена конструкция идеального алмазного коммутатора с поперечной геометрией, защищенной от облучения межэлектродной поверхности слоем осажденного ХПО-алмаза. Управление коммутатором производится либо источником спонтанного УФ излучения на основе импульсной ксеноновой лампы, либо алмазным светодиодами [24*–26*] с длиной волны излучения 235 нм и интенсивностью излучения 100 кВт/см^2.

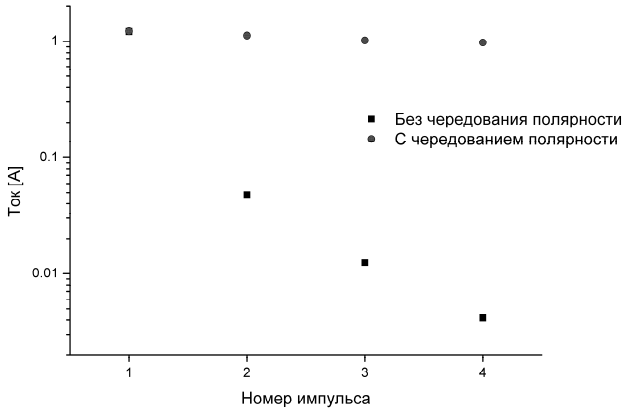


Рис. 12. Амплитуды токовых импульсов оптоэлектронного коммутатора № 5 на основе синтетического ХПО-алмаза при управлении лазерным излучением на $\lambda = 248$ нм с накоплением управляющих импульсов без чередования полярности (квадраты) и с чередованием полярности (круги) приложенного напряжения с каждым импульсом

Проведенные оценки показывают, что для достигаемого в таких условиях удельного сопротивления алмаза ~ 100 Ом·см в случае размеров алмазного образца ∅50×1 мм эффективность переключения составит $\eta \cong 0.99$ при рабочем напряжении до 100 кВ.

В п. 5.8 представлены выводы к главе 5.

В заключении перечислены основные результаты работы:

1. Исследованы спектральные и временные характеристики оптического пропускания и фото- и катодолюминесценции алмазных образцов природного и синтетического происхождения. Установлено, что для природных азотосодержащих алмазов, демонстрирующих систему люминесценции *N3*, в наносекундном временном диапазоне после импульса возбуждения в спектрах люминесценции доминирует электронно-колебательная система N_3V-дефектов. При этом в миллисекундном временном диапазоне после импульса возбуждения в спектрах люминесценции наблюдается только бесструктурная *A*-полоса люминесценции, обусловленная рекомбинацией носителей заряда на собственных дефектах решетки алмаза (sp^2-гибридизированный углерод).

2. Предложен метод неразрушающей экспресс-идентификации алмаза и его имитаторов на основе измерения спектров оптического пропускания и фотолюминесценции образцов.

3. Обнаружен адгезионный режим разрушения тонких металлических пленок (до 2 мкм) на неметаллических подложках за счет лазерно-

индуцированных термических напряжений. Для каждого металла существует свой диапазон плотностей поглощенной энергии лазерного излучения (50–350 мДж/см^2) при котором реализуется данный режим разрушения.

4. Предложен метод экспресс-диагностики силы адгезии тонких металлических пленок, напыленных на неметаллические подложки, с помощью воздействия лазерным излучением на небольшой участок пленки.

5. Достигнуты высокие эффективности переключения алмазных оптоэлектронных коммутаторов при управлении УФ лазерным (до 0.65) и спонтанным излучением (до 0.08), электронными пучками (до 0.9) пико- и наносекундной длительности.

6. Доказано, что резкое увеличение длительности и амплитуды фототока в алмазе, а также «линейность» вольтамперной характеристики алмазного коммутатора, связаны с лазерно-стимулированным электрическим пробоем межэлектродной поверхности коммутатора. Показана ошибочность гипотез возникновения данных эффектов вследствие «оптоэлектронной неустойчивости» или инжекции носителей заряда через контакты, вызванной накоплением объемного заряда на глубоких ловушках.

7. Предложены методы увеличения эффективности переключения, компактности и других параметров алмазных оптоэлектронных коммутаторов, а также способы преодоления ограничений их работы.

Список цитируемой литературы:

1*. *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.

2*. *Грехов И.В.* Импульсная коммутация больших мощностей полупроводниковыми приборами // Физика и техника мощных импульсных систем / Под ред. Велихова Е.П. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 237–253.

3*. *Yoneda H., Ueda K.-i., Aikawa Y. et al.* Photoconductive properties of chemical vapor deposited diamond switch under high electric field strength // Applied physics letters. – 1995. – V. 66, № 4. – P. 460–462.

4*. *Aikawa Y., Baba K., Shohata N. et al.* Photoconductive properties of polycrystalline diamond under high electric field strength // Diamond and related materials. – 1996. – V. 5. – P. 737–740.

5*. *Вечерин П.П., Журавлев В.В., Квасков В.Б. и др.* Природные алмазы России. – М.: Полярон, 1997. – 304 с.

6*. *Kohn E., Adamschik M., Schmid P. et al.* Prospects of diamond devices // Journal of physics D: Applied physics. – 2001. – V. 34. – P. 77–85.

7*. Алмаз в электронной технике / Под ред. В.Б. Кваскова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.

8*. *Bharadwaj P.K., Code R.F., van Driel H.M., Walentynowicz E.* High voltage optoelectronic switching in diamond // Applied physics letters. – 1983. – V. 43, № 2. – P. 207–209.

9*. *Ho P.-T., Lee C.H., Stephenson J.C., Cavanagh R.R.* A diamond opto-electronic switch // Optics communications. – 1983. – V. 46, № 3–4. – P. 202–204.

10*. *Glinski J., Gu X.-J., Code R.F., van Driel H.M.* Space-charge-induced optoelectronics switching in IIa diamond // Applied physics letters. – 1984. – V. 45, № 3. – P. 260–262.

11*. *Huo Y.S., Gu X.-J., Code R.F., Fuh Y.G.* Optical switching mechanism in type IIa diamond // Journal of applied physics. – 1986. – V. 59, № 6. – P. 2060–2067.

12*. *Panchhi P.S., van Driel H.M.* Picosecond optoelectronic switching in insulating diamond // IEEE Journal of quantum electronics. – 1986. – V. QE-22, № 1. – P. 101–107.

13*. *Feng S., Ho P.-T., Goldhar J.* Photoconductive switching in diamond under high bias field // IEEE Transactions on electronic devices. –1990. – V. 37, № 12. – P. 2511–2516.

14*. *Zaitsev A.M.* Optical properties of diamond. – Berlin: Springer, 2001. – 502 p.

15*. *Kiflawi I., Kanda H., Lawson S.C.* The effect of the growth rate on the concentration of nitrogen and transition metal impurities in HPHT synthetic diamonds // Diamond and related materials. – 2002. – V. 11. – P. 204–211.

16*. *Yelisseyev A., Lawson S., Sildos I. et al.* Effect of HPHT annealing on the photoluminescence of synthetic diamonds grown in the Fe-Ni-C system // Diamond and related materials. – 2003. – V. 12. – P. 2147–2168.

17*. *Plano M.A., Landstrass M.I., Pan L.S. et al.* Polycrystalline CVD diamond films with high electrical mobility // Science. – 1993. – V. 260. – P. 1310–1312.

18*. *Schaffer C.P., Chen I.C., Sturdivant R.L. et al.* Commercial CVD diamond films – material properties and their effects on microwave characteristics // Diamond and related materials. – 1998. – V. 7. – P. 585–588.

19*. *Nebel C.E.* Electronic properties of CVD diamond // Semiconductors science and technology. – 2003. – V. 18. – P. S1–S11.

20*. *Ральченко В., Конов В.* CVD-алмазы: Применение в электронике // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2007. – № 4. – С. 58–67.

21*. *Prasad R., Schein J., Gensler S.W., Krishnan M.* Optically triggered diamond switch // Proceedings of the 12th IEEE Pulsed Power conference. – Monterey, CA, USA, 1999. – P. 142–145.

22*. *Yoneda H., Ueda K.-i., Aikawa Y. et al.* The grain size dependence of the mobility and lifetime in chemical vapor deposited diamond photoconductive switches // Journal of applied physics. – 1998. – V. 83, № 3. – P. 1730–1733.

23*. *Joshi R.P., Kennedy M.K., Schoenbach K.H., Hofer W.W.* Studies of high field conduction in diamond for electron beam controlled switching // Journal of applied physics. – 1992. – V. 72, № 10. – P. 4781–4787.

24*. *Koizumi S., Watanabe K., Hasegawa M. et al.* Formation of diamond p-n junction and its optical emission characteristics // Diamond and related materials. – 2002. – V. 11. – P. 307–311.

25*. *Makino T., Kato H., Ogura M. et al.* Electrical and optical characterizations of (001)-oriented homoepitaxial diamond p–n junction // Diamond and related materials. – 2006. – V. 15, № 4–8. – P. 513–516.

26*. *Makino T., Tokuda N., Kato H. et al.* Electrical and light-emitting properties of (001)-oriented homoepitaxial diamond p–i–n junction // Diamond and related materials. – 2007. – V. 16, № 4–7. – P. 1025–1028.

27*. *Михайлов С.Г., Соломонов В.И.* Импульсная катодолюминесценция алмазов // Оптика и спектроскопия. – 1996. – Т. 80, № 5. – С. 781–784.

28*. *Krishnan M., Xu X., Schein J. et al.* Fast opening diamond switch for high voltage, high average power inductive energy store modulators // Proceedings of the 12th IEEE Pulsed Power conference. – Monterey, CA, USA, 1999. – P. 1222–1225.

29*. *Thomaz M.F., Davies G.* The decay time of N3 luminescence in natural diamond // Proc. Of Royal Society of London A. – 1978. – V. 362. – P. 405–419.

30*. *Lawson S.C., Kanda H., Watanabe K. et al.* Spectroscopic study of cobalt-related optical centers in synthetic diamond // Journal of applied physics. – 1996. – V. 79, № 8. – P. 4348–4357.

31*. *Goss J.P., Coomer B.J., Jones R. et al.* Extended defects in diamond: The interstitial platelet // Physical review B. – 2003. – V. 67. – P. 165208.

32*. *Kawarada H., Tsutsumi T., Hirayama H., Yamaguchi A.* Dominant free-exciton recombination radiation in chemical vapor deposited diamonds // Applied physics letters. – 1994. – V. 64, № 4. – P. 451–453.

33*. *Takiyama K., Abd-Elrahman M.I., Fujita T., Oda T.* Photoluminescence and decay kinetics of indirect free excitons in diamonds under the near-resonant laser excitation // Solid state communications. – 1996. – V. 99, № 11. – P. 797–797.

34*. *Lu T., Shigley J.E.* Nondestructive testing for identifying natural, synthetic, treated, and imitation gem materials // Materials evaluation. – 2000. – V. 58, № 10. – P. 1204–1208.

35*. *Prins J.F.* Recombination luminescence from defects in boron-ion implantation-doped diamond using low fluencies // Materials research innovations. – 1998. – V. 1. – P. 243–253.

36*. *Walker J.* Optical absorption and luminescence in diamond // Reports on progress in physics. – 1979. – V. 42. – P. 1607–1659.

37*. *Климентов С.М., Гарнов С.В., Конов В.И. и др.* Роль низкопорогового пробоя воздуха в абляции материалов короткими лазерными импульсами // Труды института общей физики. – 2004. – Т. 60. – С. 13–29.

38*. *Vladoiu I., Stafe M., Negutu C. et al.* The dependence of the ablation rate of metals on nanosecond laser fluence and wavelength // Journal of optoelectronics and advanced materials. – 2008. – V. 10, № 12. – P. 3177–3181.

Основные материалы диссертации опубликованы в работах:

1. *Schein J., Campbell K.M., Prasad R.R.,* ***Lipatov E.I.****, Panchenko A.N., Tarasenko V.F., Krishnan M.* UV absorption in diamond // Proceedings of the international conference on Lasers 2000. – Albuquerque, New Mexico, USA: STS Press, McLean, Virginia, 2001. – P. 229–234.

2. ***Липатов Е.И.****, Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Шейн Дж., Кришнан М.* Фоточувствительность алмазного детектора к лазерному излучению в диапазоне 220–355 нм // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31, № 12. – С. 1115–1117.

3. *Tarasenko V.F., Fedenev A.V., Goncharenko I.M., Koval' N.N.,* ***Lipatov E.I.****, Orlovskii V.M., Shulepov M.A.* UV and IR laser interaction with metal surfaces // Proceedings of SPIE High-power laser ablation. – 2002. – V. 4760. – P. 93–102.

4. *Феденев А.В.,* ***Липатов Е.И.****, Панченко А.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Коваль Н.Н., Гончаренко И.М.* Исследование взаимодействия УФ- и ИК-лазерного излучения с металлами и диэлектриками // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 15, № 3. – С. 288–292.

5. *Fedenev A.V., Goncharenko I.M., Koval' N.N., Orlovskii V.M., Tarasenko V.F., Panchenko A.N.,* ***Lipatov E.I.*** Study on UV and IR laser interaction with metal and dielectrics // Applied surface science. – 2002. – V. 197–198. – P. 45–49.

6. *Fedenev A.V., Alekseev S.B., Goncharenko I.M., Koval' N.N.,* ***Lipatov E.I.****, Orlovskii V.M., Shulepov M.A., Tarasenko V.F.* UV and IR laser radiation's interaction with metal films and teflon surfaces // Laser and particle beams. –2003. – V. 21. – P. 265–272.

7. *Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф.,* ***Липатов Е.И.****, Кришнан М., Томпсон Дж., Паркс Д.* Влияние плотности мощности излучения на чувствительность алмазного детектора // Известия ВУЗов: Физика. – 2004. – № 1. – С. 81–84.

8. ***Липатов Е.И.****, Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф.* Особенности импульсной фотопроводимости в 2-А алмазе при облучении лазерным УФ излучением с длиной волны 308 нм // Оптика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 17, № 2–3. – С. 215–220.

9. ***Липатов Е.И.****, Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф.* Аномальное увеличение амплитуды и длительности фототока в алмазе 2-А типа при облучении XeCl-лазером // Известия ВУЗов: Физика. – 2004. – № 2. – С. 98–99.

10. *Феденев А.В.,* ***Липатов Е.И.****, Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шулепов М.А., Коваль Н.Н., Гончаренко И.М.* Нарушение адгезии в процессе абляции тонких пленок импульсным лазерным излучением // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34, № 4. – С. 375–380.

11. *Krishnan M.,* ***Lipatov E.I.****, Parks D., Panchenko A.N., Schein J., Tarasenko V.F., Thompson J.* Photoconductive response of type IIa diamond in the 222–353-nm range // Proceedings of SPIE, Atomic and Molecular Pulsed Lasers V. – 2004. – V. 5483. – P. 230–237.

12. ***Lipatov E.I.****, Panchenko A.N., Tarasenko V.F., Thompson J., Krishnan M.* Optoelectronic switching in natural diamond with UV triggering // Proceedings of the 13th international symposium on High current electronics, Tomsk, Russia. 2004. – P. 187–190.

13. *Orlovskii V.M., Tarasenko V.F., Fedenev A.V., Alekseev S.B., Goncharenko I.M., Koval N.N.,* ***Lipatov E.I.****, Shulepov M.A., Trtica M.S., Gakovic B.M., Petkovska L.T.* Modification of thin metal and ceramic films by UV and IR laser radiation // Proceedings of SPIE, Atomic and Molecular Pulsed Lasers V. – 2004. – V. 5483. – P. 238–243.

14. ***Липатов Е.И.****, Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Алексеев С.Б., Рыбка Д.В.* Люминесценция кристаллов под воздействием субнаносекундного электронного пучка // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31, № 6. – С. 29–33.

15. ***Липатов Е.И.****, Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Алексеев С.Б.* Люминесценция кристаллов при облучении KrCl-лазером и субнаносекундным электронным пучком // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35, № 8. – С. 745–748.

16. ***Lipatov E.I.****, Tarasenko V.F.* Pulsed cathodoluminescence of free excitons from CVD diamond // Proceedings of SPIE. – 2006. – V. 6263. – P. 626318.

17. ***Lipatov E.I.**, Lisitsyn V.M., Oleshko V.I., Tarasenko V.F.* Spectral-kinetic features of pulsed cathodoluminescence of IIa type natural diamond // Известия вузов. Физика. – 2006. – № 10 (приложение). – С. 156–158.

18. ***Липатов Е.И.**, Лисицын В.М., Олешко В.И., Тарасенко В.Ф.* Спектрально-кинетические характеристики импульсной катодолюминесценции природного алмаза 2а типа // Известия вузов. Физика. – 2007. – № 1. – С. 53–57.

19. *Бакшт Е.Х., Костыря И.Д.,* ***Липатов Е.И.**, Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф.* Электроны с повышенной энергией в наносекундном электронном пучке вакуумного диода // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77, № 4. – С. 98–103.

20. ***Липатов Е.И.**, Тарасенко В.Ф.* Оптоэлектронное переключение в алмазе и оптический пробой по поверхности // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38, № 3. – С. 276–279.

21. ***Липатов Е.И.**, Авдеев С.М., Тарасенко В.Ф., Соснин Э.А., Новоселов Ю.Н.* Идентификация алмаза и его имитаторов с помощью KrCl эксилампы // Известия ТПУ. – 2009. – Т. 314, № 2. – С. 137–141.

22. *Tarasenko V.F.,* ***Lipatov E.I.**, Avdeev S.M.* Photoluminiscence and optical transmission of diamond and its imitators // XVIII International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High Power Lasers (30 August – 3 September. 2010). – Sofia. Bulgaria: Proceedings of SPIE. – 2010. – V.7751. – 77511F.

23. ***Lipatov E.I.**, Avdeev S.M., Tarasenko V.F.* Photoluminescence and optical transmission of diamond and its imitators // Journal of luminescence. – 2010. – V. 130. – P. 2106–2112.

Отпечатано на участке оперативной полиграфии
редакционно-издательского отдела ТГУ

Заказ № от «15» декабря 2011 г. Тираж 120 экз.