

А.В. Феденев, Е.И. Липатов, А.Н. Панченко, В.М. Орловский,  
В.Ф. Тарасенко, Н.Н. Коваль, И.М. Гончаренко

## Исследование взаимодействия УФ- и ИК-лазерного излучения с металлами и диэлектриками

*Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 23.11.2001 г.

На основе разработанных в Институте сильноточной электроники ускорителей и мощных генераторов импульсных напряжений создан комплекс лазерных установок для исследования воздействия лазерного излучения на поверхность металлов и диэлектриков. Комплекс состоит из лазерных систем ИК- и УФ-диапазона (длительность импульса от 10 нс до 100 мкс, энергия в импульсе до 2 кДж, средняя мощность лазерного излучения до 1 кВт), камеры для размещения образцов (диапазон давлений от  $10^{-5}$  торр до 10 атм) и спектроскопического и измерительного оборудования.

Представлены экспериментальные результаты по исследованию формирования и распространения лазерной плазмы в вакууме и газах, лазерного пробоя в среде SF<sub>6</sub> высокого давления, по облучению алмаза излучением УФ-лазера и взаимодействию излучения ИК-лазеров с поверхностью стали.

На основе разработанных в Институте сильноточной электроники СО РАН электронно-пучковых ускорителей и мощных генераторов импульсных напряжений создан целый ряд лазеров на смесях газов высокого давления [1–9]. Для проведения экспериментов по воздействию лазерного излучения на вещество с точки зрения высоких мощностей, энергий и высокой эффективности были выбраны лазеры на эксиплексных молекулах XeCl\*, CO<sub>2</sub> и HF-лазеры и лазер на атомарных переходах ксенона.

В данной статье описаны лазерные установки для исследования взаимодействия лазерного излучения

с металлами и диэлектриками и приведены предварительные результаты экспериментов.

### 1. Экспериментальное оборудование

В качестве источников возбуждения использовались ускорители с радиально сходящимся и планарным пучком электронов и установки с самостоятельным разрядом и разрядом, инициируемым пучком электронов. Основные характеристики лазерных экспериментальных установок приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры лазерных установок

Установка	Способ накачки, активный объем, частота следования импульсов	Переходы, длины волн, газовая смесь, давление	Длительность импульса, энергия, эффективность	Примечания
1	2	3	4	5
«DM»	Пучок электронов, $j = 40 \text{ А/см}^2$ , 600 л, апертура $D = 60 \text{ см}$ , моноимпульсный	XeCl, 308 нм, Ar-Xe-HCl, $p = 2 \text{ атм}$	300 нс, 2000 Дж, 4%	[2], [8]
		Xe, 1,73; 2,03 мкм, Ar-Xe, He-Ar-Xe, $p = 1,0-2 \text{ атм}$	300 нс, 100; 50 Дж, ~ 1%	[2], [4]
«Coaxial»	Пучок электронов, $I = 5-500 \text{ А}$ , 200 кВ, 20 л, апертура $D = 20 \text{ см}$ , 0,1–50 Гц	Xe, 1,73; 2,03 мкм, Ar-Xe, He-Ar-Xe, $p = 1,0-1,5 \text{ атм}$	10–1000 мкс, 6 Дж, 2%	Охлаждение водой фольги [1]
«ELON-1M»	Пучок электронов, $j = 40 \text{ А/см}^2$ , 30 л, апертура $D = 20 \text{ см}$ , моноимпульсный	XeCl, 308 нм, Ar-Xe-HCl, $p = 2,5 \text{ атм}$	300 нс, 110 Дж, 5%	[3]
		Xe, 1,73; 2,03 мкм, Ar-Xe, He-Ar-Xe	700 нс, 16 Дж, ~ 2%	
		HF (цепной) ~ 2,6–3 мкм, SF <sub>6</sub> -H <sub>2</sub>	700 нс, 200 Дж, 10%	[6, 7]

1	2	3	4	5
«Cascade»	Разряд, инициируемый пучком электронов, 72×3×2,4 см, 0,1–50 Гц	CO <sub>2</sub> , 10,6 мкм, N <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub>	15 нс – 8 мкс, 30 Дж, 1 кВт (50 Гц)	Система охлаждения и циркуляции газа [8]
«LIDA-T»	Самостоятельный разряд, 3,5×1,5×60 см, 1–5 Гц	XeCl, 308 нм, Ne-Xe-HCl, $p = 2-3$ атм  HF (нецепной) ~ 2,6–3 мкм, SF <sub>6</sub> -H <sub>2</sub>	100–450 нс, 0,2–1,0 Дж, 1–2%  350 нс, 2 Дж, 2,9%	Генератор с индуктивным накопителем энергии [5] [9]

Максимальная выходная энергия лазерного излучения в УФ-диапазоне спектра до 2 кДж была получена на  $\lambda = 308$  нм для XeCl-лазера на установке с накачкой пучком электронов активного объема 600 л [2, 8]. На той же экспериментальной установке при использовании Ag-Xe ( $\lambda = 1,73$  мкм) и Ne-Ag-Xe ( $\lambda = 2,03$  мкм) смесей была достигнута выходная энергия лазерной генерации 100 и 50 Дж соответственно [4]. Выходные энергии лазерного излучения порядка 110 Дж на  $\lambda = 308$  нм и 90 Дж на  $\lambda = 249$  нм были продемонстрированы на установке с накачкой мощным радиально сходящимся пучком электронов газового объема 30 л с выходной апертурой лазерного излучения, равной 20 см [3, 8]. Выбор геометрии накачки с радиально сходящимся пучком электронов оказался удачным для возбуждения нецепного HF-лазера. Выходная энергия генерации до 200 Дж с эффективностью до 10%, по отношению к вложенной в газ энергии пучка, была получена на переходе молекулы HF с длиной волны излучения  $\lambda \sim 2,8$  мкм [6, 7]. Средняя выходная мощность лазерного излучения до 1 кВт была реализована на CO<sub>2</sub>-лазере, возбуждаемом разрядом с предыонизацией пучком электронов с частотой следования импульсов 50 Гц [8]. Применение индуктивного накопителя энергии для накачки нецепного электроразрядного HF-лазера позволило получить лазерную генерацию с кпд до 5,5% по отношению к вложенной в газ энергии, а использование цеолитового поглотителя увеличило время работы без замены газовой смеси до 1000 импульсов [9]. Использование генератора с индуктивным накопителем для получения предимпульса в газоразрядном XeCl-лазере позволило сформировать разряд с высокой однородностью и увеличить длительность импульса генерации до 450 нс при выходной энергии генерации до 1,1 Дж и полной эффективности генерации 2,2% [5, 8].

## 2. Экспериментальные результаты и обсуждение

### Поглощение УФ-излучения в алмазе

Благодаря таким уникальным свойствам, как короткое время жизни носителей зарядов, высокая теплопроводность и радиационная стойкость, алмаз является очень перспективным материалом. Чувствительность алмаза к УФ-излучению определяет воз-

можность его использования в качестве приемника лазерного излучения или коммутатора с управлением УФ-излучением. В экспериментах использовался кристалл Па-типа размерами 3×1×0,5 мм, установленный в SMA-разъем. Для измерения параметров чувствительности, временного отклика и радиационной стойкости проводилось облучение алмазного детектора излучением эксимерных лазеров. Использовались лазеры в диапазоне длин волн от 220 до 355 нм, при этом удельные мощности излучения достигали 100 МВт/см<sup>2</sup>. Результаты эксперимента (рис. 1) указывают на то, что чувствительность алмаза зависит от длины волны и может

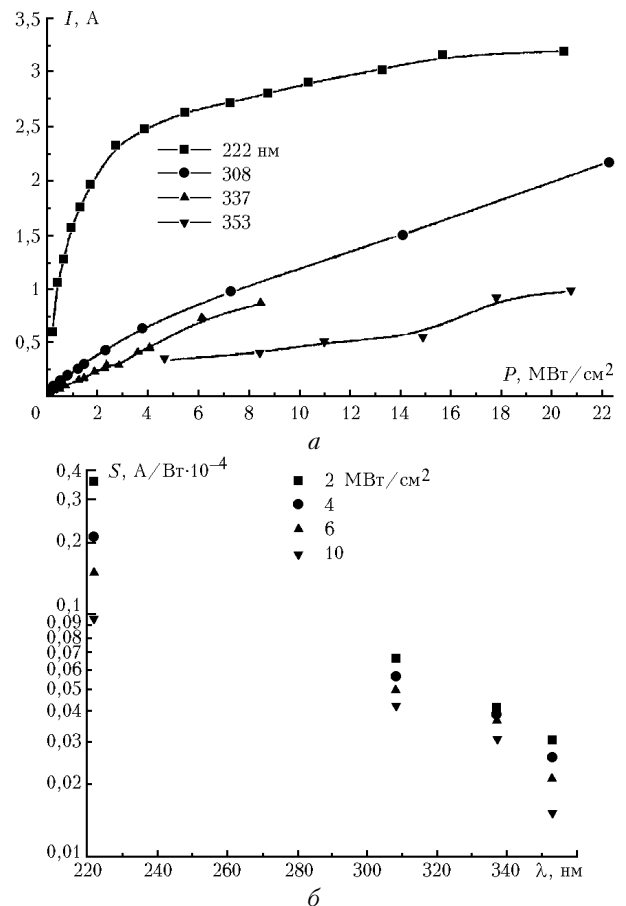


Рис. 1. Амплитуда импульса тока через алмаз в зависимости от длины волны и удельной мощности лазерного излучения (а). Чувствительность алмазного детектора, измеренная для различных длин волн в зависимости от удельной мощности излучения (б)

изменяться от  $10^{-4}$  до  $10^{-2}$  А/Вт при вариации геометрии алмаза и условий эксперимента. Пороговая плотность разрушения алмаза составила  $> 100$  МВт/см<sup>2</sup>, а временное разрешение более 1 нс. Эти свойства делают алмаз перспективным инструментом для измерения параметров излучения мощных импульсных лазеров [10].

### Расширение лазерной плазмы в газе и вакууме

Исследовался процесс образования плазмы на поверхности металлов и диэлектриков под воздействием излучения ХеСl- и КгСl-лазеров. Измерялись пороги плазмообразования и скорости расширения плазмы. Было обнаружено, что долгоживущие плазменные объекты формируются около поверхности мишени в присутствии ксенона или воздуха при давлениях 0,1–1 атм. Длительность свечения плазменных объектов была максимальна в ксеноне. Было показано, что лазерная плазма формируется в течение нескольких наносекунд после начала лазерного импульса. Скорости расширения плазмы составляли несколько десятков километров в секунду. При фокусировке лазерного пучка в малое конусообразное отверстие (2 мм диаметром и 3 мм глубиной) на металлической поверхности могут формироваться плазменные струи с четкими границами и скоростью расширения порядка 50 км/с (рис. 2).

Были продемонстрированы эффекты несимметричного прохождения тока через лазерную плазму и его обрыва. Время обрыва тока составляло порядка 10 нс, при этом скорость возрастания электрического сопротивления плазмы достигала  $10^{10}$  Ом/с. Скорость обрыва тока увеличивалась при использовании для

создания плазмы элементов с малым атомным весом и при больших скоростях нарастания тока перед обрывом. Степень ионизации плазмы насыщается перед прерыванием тока. Эффект прерывания тока был использован для создания генератора с индуктивным накопителем энергии. Генератор с плазменным эрозийным прерывателем тока, с индуктивным накопителем энергии и с током прерывания порядка 10 кА мог работать с частотой повторения импульсов до нескольких герц и был успешно применен для накачки импульсных лазеров.

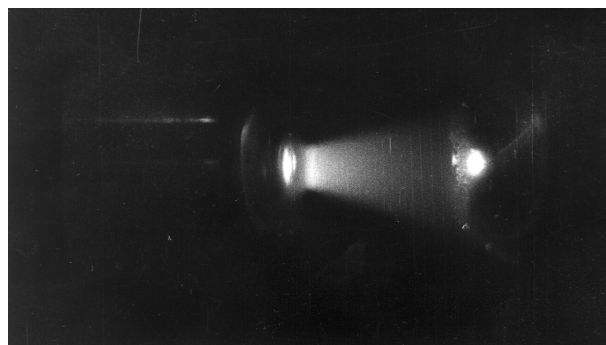


Рис. 2. Плазменная струя в вакууме. Излучение ХеСl-лазера сфокусировано в конусообразное отверстие (2 мм в диаметре, 3 мм в глубину) на поверхности алюминия (на фотографии в центре, лазерное излучение слева)

### Лазерный запуск мегавольтного разрядника

В табл. 2 представлены результаты применения эксиплексных лазеров для запуска мегавольтных

Таблица 2

Задержка и разброс срабатывания мегавольтного разрядника, запускаемого излучением УФ-лазера, сфокусированным на поверхности электрода ( $\lambda = 350$  нм)

$U_S$ , МВ	$U_S/U_{SBR}$ , %	$P$ , бар	Смесь газов	$Q_{LAS}$ , мДж	$t_{DEL}$ , нс	$\sigma$ , нс
1,02	89	2,5	SF <sub>6</sub>	45	66	5
1,02	89	2,5	SF <sub>6</sub>	30	183	30
1,02	89	2,5	SF <sub>6</sub>	30	73	7
0,99	91	5	10%SF <sub>6</sub> + 90%N <sub>2</sub>	45	56	10
0,99	91	5	10%SF <sub>6</sub> + 90%N <sub>2</sub>	30	93	20
1,02	91	10	30%SF <sub>6</sub> + 70%Ne	45	73	34
0,86	90	6	8%SF <sub>6</sub> + 92%Ar	45	16	2
0,93	90	7	9%SF <sub>6</sub> + 91%Kr	52	15	1
0,99	91	4	30%SF <sub>6</sub> + 70%Kr	50	18	2
0,93	93	3,2	53%SF <sub>6</sub> + 47%Kr	50	36	14
0,99	94	2,7	70%SF <sub>6</sub> + 30%Kr	50	51	16
0,95	91	5	9%SF <sub>6</sub> + 17%N <sub>2</sub> + 74%Kr	52	17	1
0,93	94	5	10%SF <sub>6</sub> + 45%N <sub>2</sub> + 45%Kr	52	17	2,3
0,99	91	5,1	10%SF <sub>6</sub> + 60%N <sub>2</sub> + 30%Kr	50	13	1,3
0,99	91	4,5	10%SF <sub>6</sub> + 75%N <sub>2</sub> + 15%Kr	50	25	7
0,93	91	7	10%SF <sub>6</sub> + 90%Xe	50	15	2
0,93	91	6	10%SF <sub>6</sub> + 15%N <sub>2</sub> + 75%Xe	50	15	1,5
0,91	92	5	10%SF <sub>6</sub> + 45%N <sub>2</sub> + 45%Xe	50	18	2

Примечания:  $U_S$  – напряжение на разряднике;  $U_{SBR}$  – напряжение самопробоя разрядника;  $Q_{LAS}$  – энергия;  $t_{DEL}$  и  $\sigma$  – задержка и разброс срабатывания разрядника.

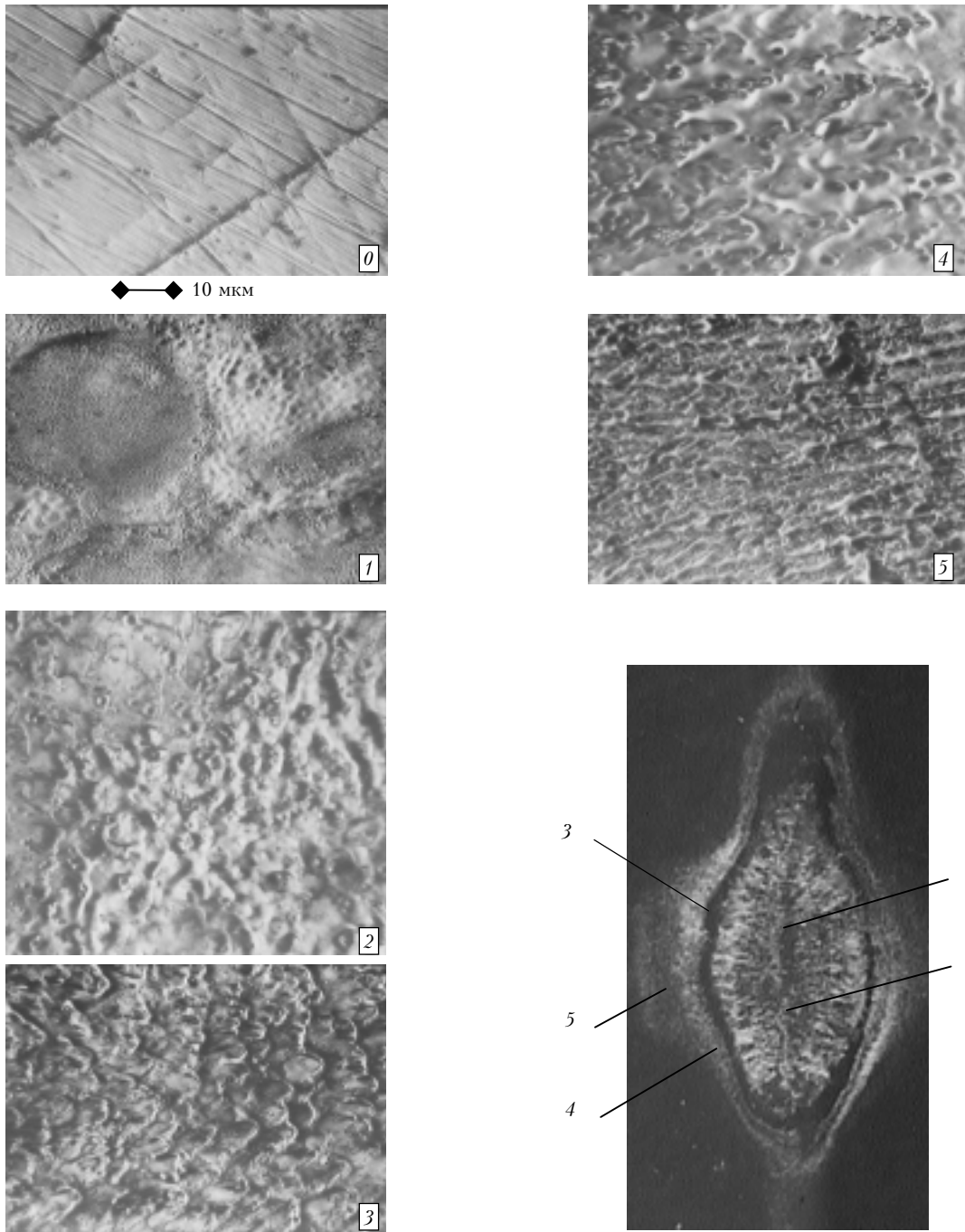


Рис. 3. Фотография отпечатка лазерного излучения HF-лазера, сфокусированного на поверхности углеродистой стали 4140 (внизу справа) и микрофотографии отдельных участков пятна в увеличенном масштабе (кадр 0 – необлученная поверхность)

газовых разрядников [11]. Минимальное время задержки между началом лазерного импульса и запуском разрядника составляло примерно 10 нс с разбросом порядка 1 нс. Получены данные, характеризующие формирование плазмы на поверхности металлической мишени под воздействием УФ-излучения и расширения плазмы в промежутке между электродами разрядника. Благодаря наименьшим порогам плазмообразования на поверхности тантал может быть рекомендован в качестве перспективного материала для изготовления электрода разрядника, запускаемого

излучением УФ-лазера. Продemonстрировано, что время задержки запуска разрядника и разброс времени запаздывания минимальны при использовании лазерного излучения с малой расходимостью и при оптическом пробое в рабочем газе.

### ***Взаимодействие лазерного излучения с поверхностью металлов***

В экспериментах использовался электроразрядный нецепной HF-лазер с энергией в импульсе 2 Дж и

длительностью импульса 350 нс. Изучаемые образцы (углеродистая сталь 4140 и нержавеющая сталь SUS304) облучались на открытом воздухе либо в вакууме. Исследовались изменение прочности поверхности в области лазерного отпечатка и изменение структуры металла в зависимости от плотности мощности лазерного излучения. Показано, что в результате вытеснения жидкого металла из эпицентра взаимодействия излучения с поверхностью образуются микрократеры глубиной ~ 1 мкм. Слои расплава, остывая на прилегающей поверхности, формируют многослойные наплывы на площади ~ 3–4 мм<sup>2</sup> в виде концентрических поясов. Выделено пять характерных зон застывания металла. Отмечается увеличение выноса материала с продвижением фокуса луча в глубь образца, при этом количество унесенного материала с поверхности за одиночный импульс составляет ~ 4·10<sup>-4</sup> г/см<sup>2</sup>.

На рис. 3 представлены фотография отпечатка лазерного излучения на поверхности стали 4140 (внизу справа), а также микрофотографии отдельных участков (№ 0–5) при большем увеличении микроскопа. Следует отметить, что результаты по воздействию лазерного излучения на поверхность металлов являются предварительными, в дальнейшем эти эксперименты будут продолжены, в том числе и с напыленными на металлы покрытиями.

Данная работа была выполнена при поддержке МНТЦ, проект № 1206.

1. Бугаев А.С., Коваль Н.Н., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В. Спектральный состав генерации в смесях Ag–Xe и He–Ag–Xe, накачиваемых радиально сходящимся пучком электронов длительностью 0,1 мс // Квант. электрон. 1992. Т. 19. № 11. С. 1064–1067.
2. Абдуллин Э.Н., Бугаев С.П., Ефремов А.М., Зорин В.Б., Ковальчук Б.М., Кремнев В.В., Логинов С.В., Месяц Г.А., Толкачев В.С., Щанин П.М. Ускорители электронов на основе генератора Маркса с вакуумной изоляцией // Приборы и техн. эксперим. 1993. № 5. С. 138–141.

3. Абдуллин Э.Н., Горбачев С.И., Ефремов А.И., Ковальчук Б.М., Логинов С.В., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Толкачев В.С., Феденев А.В., Фокин Е.А., Щанин П.М. Мощный компактный лазер с  $\lambda = 308$  и 249 нм, накачиваемый радиально сходящимся электронным пучком // Квант. электрон. 1993. Т. 20. № 7. С. 652–656.
4. Ковальчук Б.М., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В. Лазер на атомарных переходах ксенона с энергией излучения 100 Дж при накачке пучком электронов // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9. № 2. С. 160–162.
5. Tarasenko V.F., Panchenko A.N., Baksh E.H. Long-pulse efficient XeCl laser with pre-pulse formed by an inductive energy storage // Proc. of the Int. Conf. LASERS 2000 / Ed. by V.J. Corcoran and T.A. Corcoran. STS Press, McLean, VA. 2001. P. 330–333.
6. Абдуллин Э.Н., Ефремов А.М., Ковальчук Б.М., Орловский В.М., Панченко А.Н., Рыжев В.В., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Турчановский И.Ю. Лазер на смеси SF<sub>6</sub>–H<sub>2</sub> с накачкой радиально сходящимся пучком электронов // Квант. электрон. 1997. Т. 24. № 9. С. 781–785.
7. Абдуллин Э.Н., Ефремов А.М., Ковальчук Б.М., Орловский В.М., Панченко А.Н., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В. Мощный HF-лазер с накачкой нецепной химической реакцией, инициируемой пучком электронов // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 5. С. 58–64.
8. Tarasenko V.F., Baksh E.H., Fedenev A.V., Orlovskii V.M., Panchenko A.N., Skakun V.S., Sosnin E.A. Ultraviolet and infrared lasers with high efficiency // Proc. of SPIE. Conference on High-Power Laser Ablation. Santa Fe. 1998. V. 3343. P. 715–724.
9. Tarasenko V.F., Alekseev S.V., Erofeev M.V., Orlovskii V.M. Electrodischarge HF-laser on H<sub>2</sub>–SF<sub>6</sub> mixture // Proc. of the Int. Conf. LASERS 2000 / Ed. by V.J. Corcoran and T.A. Corcoran. STS Press, McLean, VA. 2001. P. 317–323.
10. Shein J., Campbell K.M., Prasad R.R., Lipatov E.I., Panchenko A.N., Tarasenko V.F., Krisman M. UV absorption in diamond // Proc. of the Int. Conf. LASERS 2000 / Ed. by V.J. Corcoran and T.A. Corcoran. STS Press, McLean, VA. 2001. P. 229–234.
11. Tarasenko V.F., Baksh E.H., Kunts S.E., Fedenev A.V., Panchenko A.N., Kim A.A., Sinebrjukhov V.A. and Volkov S.V. UV-laser produced plasma in gases and on metal targets // Proc. of SPIE. 2001. V. 4276. P. 99–104.

*A.V. Fedenev, E.I. Lipatov, A.N. Panchenko, V.M. Orlovskii, V.F. Tarasenko, N.N. Koval, I.M. Goncharenko. Study of UV and IR laser radiation interaction with metals and dielectrics.*

Laser complex for study of laser radiation interaction with metal and dielectric surfaces based on accelerators and powerful pulsed voltage generators developed at the Institute of High Current Electronics have been created. The complex consists of the laser systems operating in the UV and IR regions (pulse duration is 10 ns to 10  $\mu$ s, energy in an impulse is up to 2 kJ, average power of laser radiation is up to 1 kW), a chamber for samples location (pressure range is 10<sup>-5</sup> Torr to 10 atm), and spectroscopic and measuring equipment. Experimental results on study of laser plasma formation and propagation in vacuum and gases, laser breakdown in the high pressure SF<sub>6</sub> gas, irradiation of a diamond by UV laser radiation and interaction of IR laser radiation with the surface of steel are presented.