

Влияние механизма инициирования сильноточного импульсного ксенонового разряда на оптическую деградацию кварцевой оболочки в УФ-области спектра

С. Г. Киреев, С. В. Гавриш, С. Г. Шашковский

Представлены результаты исследования влияния организации инициирования разряда на долговечность импульсной газоразрядной трубчатой лампы в спектральном диапазоне 200–300 нм. При последовательной схеме инициирования энергия излучения лампы снижается на 50 % от начального значения за 600 тысяч импульсов, что объясняется развитием слаботочного разряда по образующей разрядной колбы лампы, обращенной к «земляной» поверхности установки, и воздействию на нее повышенных тепловых и радиационных потоков на стадии формирования сильноточного разряда. За счет поддержания слаботочного плазменного канала, стабилизированного по оси лампы, получено снижение скорости оптической деградации оболочки лампы в 8–10 раз при наработке в 1 млн импульсов.

Ключевые слова: импульсная лампа, кварц, излучение, ресурс, наработка, УФ, инициирование, поджиг.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-1-90-96

Введение

Роль механизма инициирования импульсного ксенонового разряда заключается в создании предварительной ионизации межэлектродного промежутка газоразрядной лампы для дальнейшего формирования сильноточного плазменного канала [1, 2]. От особенностей способа инициирования, определяющего пространственное месторасположение начала форсированной термической ионизации разрядного объема, зависит теплофизическое состояние оболочки (колбы), ограничивающей плазменный столб. Под воздействием физиче-

ских и химических процессов в плазме и электродах на поверхности и в толще стенки колбы будут происходить обратимые и необратимые механизмы, приводящие к снижению механической прочности и оптического пропускания кварцевой оболочки, и как следствие, к уменьшению срока службы импульсной лампы [3, 4]. Таким образом, является актуальной задача, направленная на выявление связи особенностей инициирования газового разряда и долговечности импульсной ксеноновой лампы. При этом особую значимость приобретает решение данной проблемы для УФ-диапазона спектра 200–300 нм, где располагается коротковолновая граница пропускания кварцевого стекла, и его оптические свойства особенно чувствительны к внешним теплофизическим воздействиям.

Анализ современных способов инициирования импульсного разряда

В настоящее время наибольшее распространение получили четыре основных способа инициирования газового разряда:

Киреев Сергей Геннадьевич, нач. лаб.
Гавриш Сергей Викторович, нач. отдела, д.т.н.
E-mail: svgavr@list.ru
Шашковский Сергей Геннадьевич, гл. конструктор,
к.т.н.
ООО «НПП «Мелитга».
Россия, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 16/10.

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2021 г.

© Киреев С. Г., Гавриш С. В., Кулебякина А. И.,
Шашковский С. Г., 2022

1. Самопробой – произвольное возникновение электрического разряда при приложении к электродам газоразрядной лампы рабочего напряжения от накопительного конденсатора [1, 2]. Данный механизм формирования плазменного канала сегодня используется довольно редко, так как требует приложения высокого напряжения, в основном, избыточно для решаемой прикладной задачи.

2. Зажигание лампы посредством внешнего размещенного на поверхности оболочки электрода (внешний поджиг), обеспечивающего предварительную ионизацию наполняющего лампу газа, необходимую для возникновения самостоятельного разряда [1, 2, 4–7].

3. Пробой разрядного промежутка лампы с помощью последовательно (или параллельно) соединенного с ней высоковольтного импульсного трансформатора (внутренний поджиг) [1, 2, 4, 5, 7].

4. Режим вспомогательного разряда (дежурной дуги), поддерживающий непрерывное «горение» слаботочного плазменного канала, в котором начинается форсированная ионизация при разряде накопительного конденсатора [1, 2, 4, 7]. Первичный пробой разрядного промежутка газоразрядной лампы в данном случае выполняется обычно с использованием внешнего или внутреннего поджиггов.

Приведенные способы иницирования сильнотоочного газового разряда отличаются механизмами предварительной ионизации плазмообразующей среды. В случае самопробоя или внутреннего поджига распространение стримера имеет произвольное направление вдоль стенки разрядной трубки [1, 4], в то время как при внешнем иницировании разряда плазменный канал развивается вдоль электрода зажигания [1, 5–7], строго повторяя его форму (прямая, спиральная или комбинированная конфигурации). При этом, как следует из работы [6], если электрод зажигания намотан по спирали, то силовой плазменный канал развивается в радиальном направлении от стенок к центру, а при расположении электрода поджига вдоль образующей лампы канал разряда распространяется от этой линии к противоположной стенке колбы.

При использовании режима дежурной дуги вспомогательный плазменный канал сконцентрирован по оси лампы, поэтому развитие основного разряда происходит симметрично и однородно [1, 2, 4, 7].

Таким образом, плазменный канал при каждом конкретном виде иницирования разряда имеет свое пространственное расположение и, как следствие, в различной степени воздействует на ограничивающую его кварцевую стенку.

В исследованиях других авторов, результаты которых обобщены в работе [3], наблюдаемое явление связывается с множеством физико-химических процессов в разрядном объеме импульсной лампы, из которых наиболее значимыми представляются следующие данные:

- при термическом воздействии плазмы в присутствии примесей остаточных газов и паров испаряющихся металлов (вольфрам, молибден и т. д.) происходит разложение двуокиси кремния с образованием соединений, снижающих оптическое пропускание оболочки;

- нагрев внутренней поверхности оболочки, способствующий изменению агрегатного состояния кварцевого стекла (кипение и испарение), приводит к эффекту обратимой непрозрачности этого материала, т. е. происходит «запирание» УФ-излучения;

- возникающая под воздействием высокотемпературной плазмы эрозия электродов способствует точечному расплавлению кварца в результате капельного оседания на поверхность оболочки, локального внедрения электродного материала в стекло, мелкодисперсное разьедание поверхности оболочки парами веществ, входящих в состав электрода.

Все исследованные авторами [3] процессы, способствующие уменьшению прозрачности оболочек импульсных ламп в видимом и ближнем ИК-диапазонах, изучены для одного конкретного вида иницирования разряда. Научных исследований, посвященных сопоставлению влияния различных способов иницирования разряда на деградационные процессы поверхности кварцевой оболочки, приводящие к снижению оптического пропускания излучения в УФ-части спектра, в течение всего срока службы импульсной лампы, до настоящего времени не проводилось.

Методика экспериментальных исследований

В исследованиях проводилось сопоставление воздействия плазменного канала на по-

верхность кварцевой оболочки для двух видов инициирования разряда:

- внутренний поджиг, когда перед разрядом рабочего конденсатора емкостью 61 мкФ с напряжением 1,38 кВ на лампу подавался высоковольтный импульс с амплитудой около 20 кВ;

- непрерывно горящий плазменный канал поддерживался стабилизатором тока 400 мА (режим дежурной дуги), в котором с частотой 3,3 Гц формировался силовой импульс тока от описанного выше разрядного контура.

В качестве объекта исследования использовалась импульсная ксеноновая лампа, представляющая собой наполненную ксеноном разрядную трубку 1 из оптически прозрачного в УФ-диапазоне кварцевого стекла, в концевых частях которой герметично установлены катод 2 и анод 3. Межэлектродное расстояние у исследуемого образца составляло 120 мм, а внутренний диаметр лампы ≈ 5 мм. Для термостабилизации теплофизического состояния оболочки разрядной трубки лампа размещалась во внешней кварцевой колбе 4. Электрическое питание исследуемой лампы осуществлялось от серийной установки, обеспечивающей указанные выше параметры инициирования разряда. Необходимо отметить важный аспект, что ось разрядного промежутка лампы располагалась на расстоянии 35 мм от поверхности 5 установки (рис. 1).

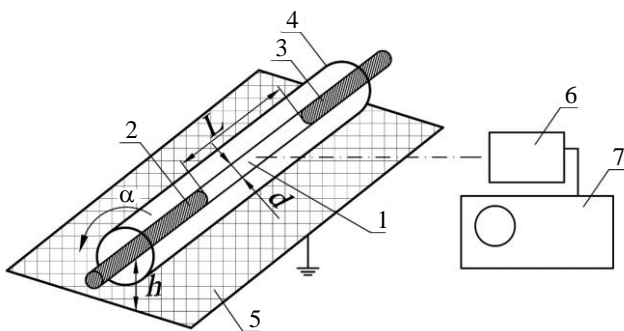


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – разрядная трубка исследуемой лампы; 2 – катод; 3 – анод; 4 – внешняя колба; 5 – отражающая металлическая поверхность установки; 6 – фотоприемное устройство; 7 – осциллограф; l – межэлектродное расстояние; d – диаметр разрядного промежутка; h – расстояние от оси лампы до поверхности установки; α – угол поворота лампы

Исследования спектральных характеристик излучения в диапазоне длин волн 200–400 нм проводились на оптоволоконном спектрометре AvaSpec-ULS2048-USB.

С учетом описанных выше теплофизических процессов, приводящих к неравномерному по окружности воздействию на кварцевую оболочку лампы, исследование спектрально-энергетических характеристик (азимутальной равномерности деградации) производилось в четырех положениях лампы при ее повороте вокруг своей оси на угол $\alpha = 90^\circ$ (рис. 1). Измерения в каждом положении лампы проводились после ее непрерывной работы в течение пяти минут не менее трех раз, после чего полученные результаты усреднялись.

Результаты экспериментальных исследований

В качестве критерия оценки деградационных процессов кварцевой оболочки в течение срока службы лампы принималось снижение энергии излучения в исследуемом спектральном диапазоне в относительных единицах (процентах) по отношению к значениям, полученным при приемо-сдаточных испытаниях.

На первом этапе трубчатые ксеноновые лампы испытывались в схеме с последовательным иницированием разряда. Вкладываемая в контур энергия составляла $\approx 10\%$ от предельного значения, рассчитанного по зависимости, полученной авторами работы [1]:

$$W_{\text{пр}} \approx 3250\pi dl\sqrt{\tau}$$

где l , d – длина и диаметр плазменного канала (рис. 1); τ – длительность импульса на уровне 0,35 мкс.

Снижение энергии излучения в спектральном диапазоне 200–300 нм на 50% происходит примерно после наработки импульсной лампы в 600 тысяч импульсов (рис. 2), что в среднем на 1 порядок ниже ожидаемого результата [1].

Такое расхождение в первую очередь объясняется различными спектральными диапазонами, выбранными для оценки долговечности лампы. Так, энергия излучения той же лампы в спектральном диапазоне 200–230 нм уменьшается на 50% в течение 200 тыс. импульсов, а в диапазоне 200–400 нм данный процесс происходит за 1 млн импульсов (рис. 3).

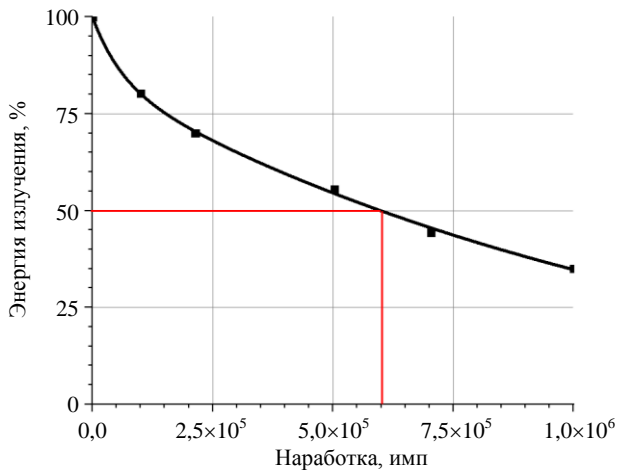


Рис. 2. Зависимость относительной энергии излучения в диапазоне 200–300 нм от наработки импульсной лампы

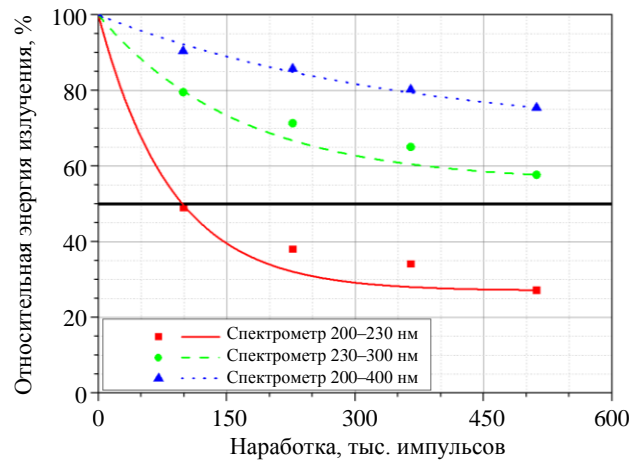


Рис. 3. Снижение относительной энергии излучения в различных спектральных диапазонах с наработкой лампы



Рис. 4. Внешний вид импульсной трубчатой лампы после срока службы в 1 млн импульсов

Анализ внешнего вида лампы (рис. 4) показал, что в выбранном режиме распыление электрода не является эффектом, определяющим оптическую деградацию оболочки лампы.

Формируемый на внутренней поверхности разрядной трубки желто-коричневый налет, по-видимому, является продуктом диссоциации кварца [3], что существенно снижает пропускание оболочки лампы. Причем, сопоставление графиков на рисунке показывают, что основные процессы снижения оптического пропускания оболочки проходят близко к коротковолновой границе прозрачности кварца, т. е. в спектральном диапазоне 200–230 нм.

Визуальный анализ исследованных импульсных ламп показал существенную неравномерность распределения желто-коричневого налета по внутренней поверхности колбы. Наиболее плотной окраской обладает налет в части лампы, обращенной к поверхности 5 экспериментального стенда (рис. 1).

Для проверки выдвинутой гипотезы были проведены ресурсные испытания с контролем энергии УФ-излучения по азимуту лампы (рис. 5), подтвердившие ускоренное падение энергии излучения при замерах со стороны разрядной трубки, обращенной к поверхности 5 (рис. 1).

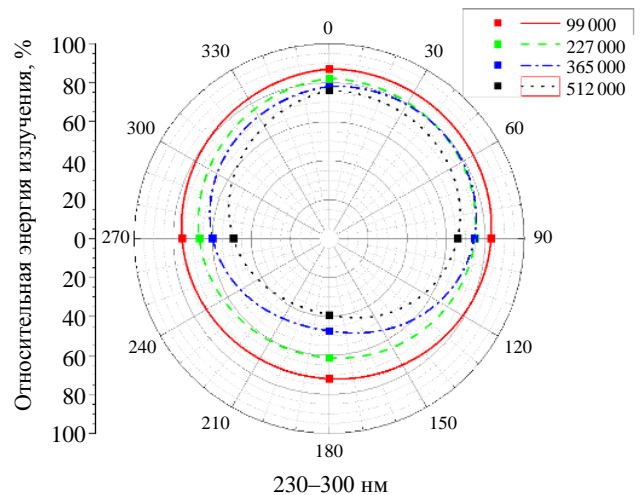
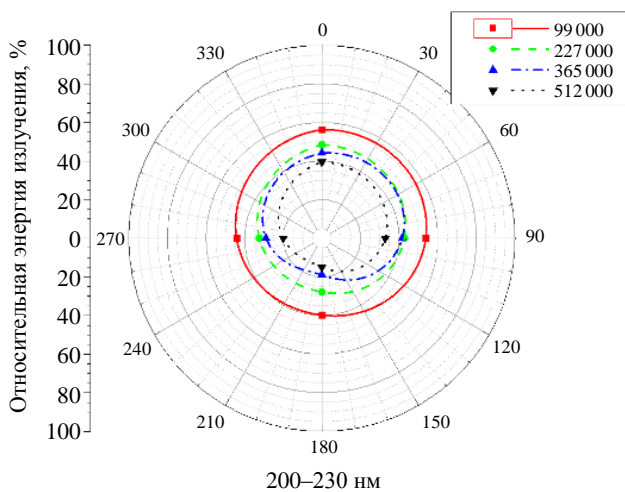


Рис. 5. Азимутальное снижение энергии излучения в течение наработки лампы. 180° соответствует нижней части лампы, обращенной к поверхности 5 на рис. 1.

Установлено, что в спектральном диапазоне 230–300 нм по истечении 512 тыс. вспышек лампы энергия излучения в нижней части разрядной трубки снизилась \approx на 61 %, в то время как в верхней зоне падение интенсивности УФ-излучения составило только 24 %. Высокая скорость оптической деградации в разрядной части оболочки импульсной трубчатой лампы со стороны, обращенной к поверхности 5 (рис. 1), подтвердилась на всех исследуемых образцах. Такой эффект, предположительно, связан с ростом локальной температуры из-за смещения плазменного канала в сторону заземленной поверхности 5 и, соответственно, возросшими теплофизическими воздействиями на стенку за счет излучения и теплопроводности.

Наблюдаемый эффект можно объяснить комбинацией одновременно двух способов инициирования разряда, а именно, внутренний поджиг посредством пробоя разрядного промежутка высоковольтным импульсом и внешнего зажигания, где в качестве электрода поджига выступает заземленная поверхность 5 (рис. 1) установки. В данном случае слаботочный плазменный канал, возникающий при высоковольтном зажигании, вынужден развиваться по образующей разрядной трубки, обращенной к поверхности 5, и дальнейшая форсированная ионизация формируется в сторону оси лампы. Важно отметить, что данные процессы происходят при каждом разряде накопительного конденсатора, т. е. при вспышке импульсной лампы рассматриваемая поверхность разрядного объема подвергается более высокому тепловому и радиационному воздействию, чем противоположная стенка. Данное предположение нашло подтверждение в работе [8], в которой предложена математическая модель развития импульсного ксенонового разряда в импульсных лампах при значительном смещении оси плазменного канала в сторону стенки разрядной трубки. В результате расчетных исследований показано, что температура внутренней стенки лампы, наиболее близко расположенной к оси плазменного столба, после завершения импульса разряда более чем в 2,5 раза выше температуры противоположной стенки. Стоит отметить, что в работе [8] математическая модель пред-

полагала развитие разряда на определенном расстоянии от стенки разрядной трубки, что, очевидно, занижает ее расчетную температуру.

Избежать указанной негативной ситуации возможно, если применить способ удерживающий слаботочный плазменный канал на оси лампы (режим непрерывно горящей дежурной дуги). В таком случае расширение плазменного канала на его сильноточной стадии будет происходить радиально от осевой линии лампы с равномерным распределением концентрации тепловых потерь разряда по внутренней поверхности оболочки.

Испытания на долговечность импульсной ксеноновой лампы при осесимметричном развитии разряда из слаботочного вспомогательного плазменного канала показали снижение энергии излучения в спектральном диапазоне 200–300 нм примерно на 10 % через 1 млн импульсов. Для сравнения энергии излучения лампы, работающей в контуре с инициированием разряда последовательным поджигом, составило \approx 62 % (рис. 6).

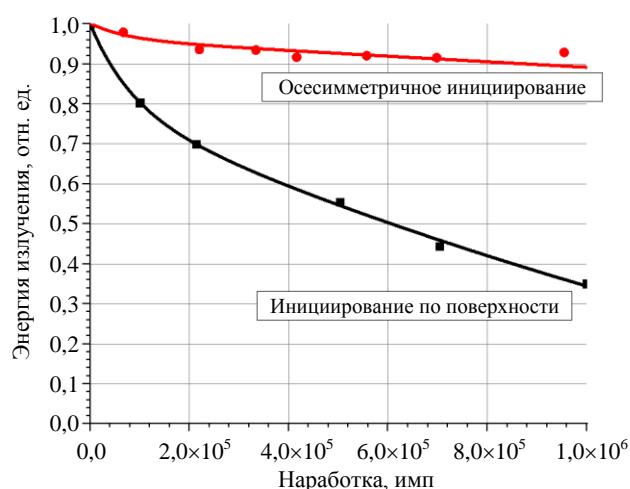


Рис. 6. Снижение энергии излучения импульсной ксеноновой лампы в течение срока службы при различных механизмах инициирования разряда

Анализ внешнего вида показал отсутствие визуально различимого желто-коричневого налета на колбе лампы через примерно 1 млн импульсов, что подтверждает правомочность использования режима вспомогательного разряда с целью снижения влияния процессов оптической деградации оболочки и повышения излучательной способности импульсной лампы в рассматриваемых режимах в течение срока службы.

Однако, стоит отметить, что использование вспомогательного разряда снижает общую эффективность системы из-за дополнительно потребляемой слаботоочным разрядом мощности. В описанной выше системе снижение эффективности составляет около 20 %.

Заключение

В работе проведены сравнительные исследования влияния различных механизмов инициирования разряда на процессы оптической деградации внутренней поверхности кварцевой оболочки разрядной трубки. Показано, что применение осесимметричного развития разряда наиболее эффективно для обеспечения высокого срока службы импульсного источника УФ-излучения при работе лампы в системах с близко расположенными к плазменному каналу отражающими поверхностями. С прикладной точки зрения такой подход приводит с одной стороны к росту долговечности импульсной лампы, а с другой – к снижению эффективности преобразования электрической энергии в излучательную. Авторы считают, что данные результаты могут быть полезны для разработчиков лазерных систем с

накачкой активных элементов импульсными лампами, размещенными в эллипсоидных осветителях, светосигнальных устройствах с параболоцилиндрическими отражателями и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маршак И. С. Импульсные источники света. – М.: Энергия, 1978.
2. Басов Ю. Г. // Электронная техника. Сер. Электрорадиодетали и газоразрядные приборы. 1983. № 4 (99). С. 23.
3. Кобзарь А. И., Константинов Б. А., Андреев Ю. П., Енгоян С. С., Иванов В. В., Розанов А. Г. Обзоры по электронной технике. Серия II. Лазерная техника и оптоэлектроника. Физические основы надежности источников оптической накачки импульсных твердотельных лазеров Обзоры по электронной технике. Сер. Лазерная техника и оптоэлектроника. – М.: ЦНИИ Электроника, 1981.
4. Никифоров В. Г. // Электронная техника. Сер. Лазерная техника и оптоэлектроника. 1978. № 2. С. 128.
5. Волкова Г. А., Смоляр Т. Я. // ЖПС. 1974. № 4. С. 717.
6. Басов Ю. Г., Болдырев С. А., Дзюбанов С. Ф., Фомин В. В. // ТВТ. 1978. Т. 16. № 5. С. 1095.
7. Белостоцкий Б. Р., Любавский Ю. В., Овчинников В. М. Основы лазерной техники. – М.: Советское радио, 1972.
8. Kushner M. // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 57. № 7. P. 2486.

PACS: 52.80.Yr

Influence of flash ignition mechanism of high-current pulsed xenon discharge on the optical degradation of the quartz shell in the UV region of the spectrum

S. G. Kireev, S. V. Gavrish, and S. G. Shashkovskiy

Scientific and Industrial Enterprise "Melitta", Ltd
16/10 Mikluho-Maklaya st., Moscow, 117977, Russia
E-mail: svgavr@list.ru

Received November 29, 2021

The study results of the influence of the discharge ignition on the flash lamp lifetime in the spectral range of 200–300 nm are presented. With a sequential ignition scheme, the radiation energy of the lamp decreases by 50 % of the initial value for 600 thousand pulses. It is explained by the development of a low-current discharge along the generatrix of the discharge bulb, facing the ground surface of the unit, and the effect on it of increased heat and radiation fluxes at the stage of formation high-current discharge. By maintaining a low-current arc discharge, stabilized along the axis of the lamp, a decrease in the optical

degradation rate of the lamp bulb by a factor of 8–10 with an operating time of 1 million pulses was obtained.

Keywords: flash lamp, quartz, radiation, lifetime, UV, flash lamp ignition.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-1-90-96

REFERENCES

1. I. S. Marshak, *Pulsed light sources* (Springer US, New York, 1984; Energia, Moscow, 1978).
2. Yu. G. Basov, *Elektronnaya tekhnika. Ser. Elektrovakuumnye i gazorazryadnye pribory*, No. 4 (99), 23 (1983) [in Russian].
3. A. I. Kobzar', B. A. Konstantinov, Yu. P. Andreev, S. S. Engoyan, V. V. Ivanov, and A. G. Rozanov, *Obzory po elektronnoj tekhnike. Seriya II. Lazernaya tekhnika i optoelektronika. Fizicheskie osnovy nadezhnosti istochnikov opticheskoy nakachki impul'snyh tverdotel'nyh lazerov* *Obzory po elektronnoj tekhnike. Ser. Lazernaya tekhnika i optoelektronika* (CNII Elektronika, Moscow, 1981) [in Russian].
4. V. G. Nikiforov, *Elektronnaya tekhnika. Ser. Lazernaya tekhnika i optoelektronika* **2**, 128 (1978) [in Russian].
5. G. A. Volkova and Y. Ya. Smolyar, *ZPS*, No. 4, 717 (1974) [in Russian].
6. Yu. G. Basov, S. A. Boldyrev, S. F. Dzyubanov, and V. V. Fomin, *TVT* **16** (5), 1095 (1978) [in Russian].
7. B. R. Belostockij, Yu. V. Lyubavskij, and V. M. Ovchinnikov, *Osnovy lazernoj tekhniki* (Sovetskoe radio, Moscow, 1972) [in Russian].
8. M. Kushner, *J. Appl. Phys.* **57** (7), 2486 (1985).