

04

© 1990 г.

ОБЪЕМНЫЙ САМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ РАЗРЯД С ПРЕДИОНИЗАЦИЕЙ УФ И МЯГКИМ РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

*С. Л. Кулаков, А. А. Кучинский, А. Г. Масленников,
Ю. В. Рыбин, В. А. Смирнов, В. П. Томашевич, И. В. Шестаков*

Проведено прямое сравнение особенностей формирования объемного самостоятельного разряда (ОСР) в длинном межэлектродном зазоре ($d=22$ см) импульсного электроразрядного CO_2 лазера атмосферного давления при использовании УФ и рентгеновского предйонизаторов. Показано, что в случае подсветки мягким рентгеновским излучением с эффективной энергией квантов $E_{\text{эфф}} \approx 5$ кэВ, генерируемых плазмой наносекундного скользящего разряда, однородный ОСР реализуется для лазерных газовых смесей, содержащих большее количество молекулярных газов, чем в случае использования УФ излучения. Рассмотрена зависимость формирования однородного ОСР от длительности фронта импульса напряжения (60 нс — 2 мкс), подаваемого на разрядный промежуток. Установлено, что использование легкоионизируемой добавки (триэтиламин) в случае рентгеновской предйонизации приводит к уменьшению энергии лазерной генерации вследствие потери оптической прозрачности активной среды CO_2 лазера.

Введение

В настоящее время известно два подхода к формированию устойчивого объемного самостоятельного разряда (ОСР) атмосферного давления, применяемого для накачки мощных газовых лазеров большой апертуры. Первый, традиционный, подход основан на создании в разрядном промежутке (РП) начальной концентрации электронов $n_0 \geq 10^6 \text{ см}^{-3}$ и достаточно быстром (< 1 мкс) подъеме напряжения на РП до величины, превышающей статическое пробивное напряжение газовой смеси [1]. Второй подход заключается в заполнении РП электронами от предйонизатора, расположенного вблизи катода, за счет дрейфа в медленно нарастающем электрическом поле [2, 3]. Особенностью второго метода является необходимость работы предйонизатора в течение полной длительности фронта импульса напряжения. Кроме того, этот способ до сих пор реализован в газовых смесях, содержащих легкоионизируемые вещества (ЛВ) и обеспечивающих поддержание концентрации электронов в слабых электрических полях.

Реализация первого метода формирования ОСР в длинных РП связана с применением источника ионизирующего излучения, имеющего повышенную проникающую способность (электронные пучки, рентгеновское и УФ излучения). Электронные пучки могут обеспечивать уровень n_0 до 10^{12} см^{-3} на значительных расстояниях, но требуют надежной биологической защиты. УФ предйонизаторы при их относительной простоте и надежности не могут использоваться при межэлектродных зазорах, больших 10—15 см, из-за малой проникающей способности УФ излучения. В настоящее время известны работы [4, 5], в которых показана возможность формирования ОСР в межэлектродных зазорах d' до 20 см, использующих предйонизацию рентгеновским излучением с энергией квантов 40—50 кэВ. Такое излучение обладает невысоким коэффициентом поглощения, поэтому обеспечивает уровень $n_0 \leq 10^7 \text{ см}^{-3}$ [5]. Очевидно, что одна из возможностей повышения эффективности рентгеновского предйонизатора связана с уменьшением энергии квантов до значений 5—10 кэВ (мягкое рентгеновское излучение (МРИ) при сохранении высокой интенсивности излучения).

Указанным требованиям отвечает излучение, генерируемое плазмой наносекундного скользящего разряда [6, 7].

Цель данной работы заключалась в проведении прямого сравнения условий формирования ОСР в длинном ($d=22$ см) РП с предьонизацией активной среды УФ излучением и МРИ, генерируемым плазмой наносекундного скользящего разряда.

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Электродная система разрядного промежутка была образована профилированными электродами: 1 — анод, 2 — катод. В плоской части катода имелось окно для вывода ионизирующего излучения площадью 30×60 см, выполненное из латунной сетки с коэффициентом прозрачности по свету ~ 0.7 . Расстояние между электродами 1 и 2 равнялось $d=22$ см, а рабочий объем, заполненный ОСР, $V \approx 40$ л. Максимальная неоднородность статического электрического поля в данной электродной системе не превышала 5%. Герметический корпус разрядной камеры был изготовлен из оргстекла.

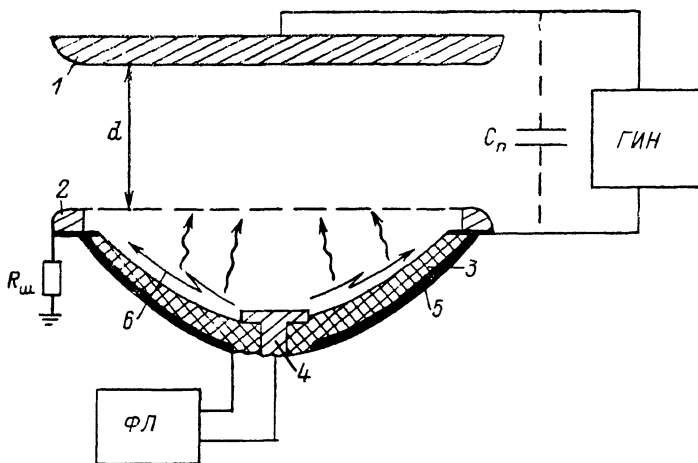


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — анод; 2 — катод; 3 — профилированный диэлектрик; 4, 5 — высоковольтный и заземленный электроды формирующей линии; 6 — плазма наносекундного скользящего разряда; ФЛ — двойная полосковая формирующая линия.

Для питания ОСР использовался четырехступенчатый ГИИ, собранный по схеме Аркадьева—Маркса, с емкостью в ударе $C_0=0.125$ мкФ, индуктивностью $L \approx 8 \cdot 10^{-7}$ Гн. Каждая ступень ГИИ коммутировалась трехэлектродным управляемым разрядником под давлением [8]. Изменение режима работы разрядников и подключение к РП добавочной емкости ($C_n \approx 10^{-8}$ нФ) позволяло варьировать длительность фронта импульса напряжения в пределах от 60 нс до 2.5 мкс. Зарядное напряжение ГИИ в проведенных экспериментах составляло 50—70 кВ, что обеспечивало удельный энерговыход в ОСР $W=60-125$ Дж·л⁻¹.

Конструкция УФ предьонизатора состояла из системы линейных многозазорных излучателей с плотностью искр ~ 0.5 см⁻², для питания которой использовался емкостной накопитель с энергозапасом ~ 400 Дж ($C \approx 0.5$ мкФ, $U=40$ кВ) [9]. Подобные устройства широко используются в современных конструкциях импульсных газовых лазеров атмосферного давления, обеспечивая в межэлектродных зазорах $d \leq 10-15$ см, начальную концентрацию фотоэлектронов $n_0 \approx 10^7$ см⁻³ [10].

Конструкция рентгеновского предьонизатора, использовавшегося в работе, была разработана на основе эффекта убегающих электронов в плазме наносекундного скользящего разряда [6]. Предьонизатор состоит из высоковольтного генератора наносекундных импульсов напряжения (рис. 1, ФЛ) и излучателя мяг-

кого рентгеновского излучения. Высоковольтный генератор был изготовлен по схеме двойной полосковой формирующей линии, в качестве коммутатора которой использовался управляемый трехэлектродный рельсовый разрядник ($P=6$ атм, азот). Импульсная зарядка линии осуществлялась от первой ступени ГИНа, что обеспечивало жесткую синхронизацию срабатывания генератора с регулируемой задержкой $0-0.5$ мкс относительно фронта основного напряжения. На согласованной нагрузке ($2\rho \approx 22$ Ом) генератор формировал импульсы напряжения амплитудой ~ 300 кВ с длительностью фронта ~ 2 нс при полной длительности импульса ~ 10 нс. Энергозапас генератора составил ~ 18 Дж.

Излучатель представлял собой выпущутую оргстеклянную поверхность (рис. 1, 3), профиль которой был выбран согласно рекомендациям работы [7]. Внешняя металлизированная поверхность излучателя — подложка 5 соединялась с заземленным корпусом высоковольтного генератора. Внутренняя, вдоль которой формировался наносекундный скользящий разряд 6, находилась непосредственно под сетчатым электродом в той же газовой среде, что и основные электроды ОСР. Расстояние от высоковольтного электрода-излучателя (один из электродов двойной полосковой формирующей линии шириной 40 см) (рис. 1, 4) до сетчатого заземленного катода — выходного окна излучателя ($S=30 \times 60$ см) составляло 8 см, а вдоль поверхности профилированного диэлектрика (поперечное сечение излучателя) — 15 см. При этом площадь излучающей поверхности, т. е. поверхности плазмы наносекундного скользящего разряда, составляла 2500 см². Конструктивно излучатель и высоковольтный генератор (ФЛ) были собраны в едином металлическом корпусе, являющемся заземленным электродом двойной полосковой формирующей линии.

В процессе экспериментов регистрировались напряжение на РП и ток ОСР, проводилось фотографирование разряда, по фототоку измерялась начальная концентрация фотоэлектронов [7]. Методом ослабления в Al фольгах оценивалась эффективная энергия рентгеновского излучения. Для снятия генерационных характеристик использовался резонатор, образованный медным вогнутым зеркалом с радиусом кривизны 12 м (\varnothing 350 мм) и плоской пластиной из Ge (\varnothing 190 мм). Расстояние между зеркалами составляло 3 м. Резонатор охватывал $\sim 45\%$ (~ 18 л) полного активного объема. Часть излучения, отраженная от плоской пластины из ВаF₂, регистрировалась матрицей из калориметров ЭЛ-50-2.

Экспериментальные результаты

1. Начальная концентрация электронов. Измерение характеристик мягкого рентгеновского излучения от рентгеновского предионизатора (МРП) выявило ряд особенностей, связанных с механизмом генерации «убегающих» электронов в скользящем наносекундном разряде. Возникновение МРИ носило ярко выраженный пороговый характер по отношению к амплитуде и полярности импульса напряжения ($\tau_{\phi}=2$ нс=const) формирующей линии. Так, для гелия ($p=1$ атм) МРИ возникало при $U \sim 140$ кВ, а для смеси $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He}=1 : 1 : 8$ — при $U=160$ кВ. Изменение отрицательной полярности импульса напряжения на положительную приводило к уменьшению интенсивности излучения более чем в ~ 1000 раз. Увеличение длительности фронта импульса напряжения с 2 до 5 нс также уменьшало интенсивность излучения в ~ 2 раза. Во всех дальнейших экспериментах МРП работал в режиме, обеспечивающем максимальную интенсивность МРИ: скользящий разряд формировался под действием импульса напряжения отрицательной полярности амплитудой ~ 220 кВ, $\tau_{\phi} \approx 2$ нс, $\tau_0 \approx 10$ нс. В данном режиме коротковолновая граница МРИ для гелия и смеси $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He}=1 : 1 : 8$ при атмосферном давлении составляла 25 и 35 кэВ соответственно, а эффективная энергия излучения не превышала 5 кэВ. Длительность импульса МРИ на полувысоте равнялась 6 нс.

На рис. 2 приведены зависимости начальной концентрации фотоэлектронов, генерируемые МРП в разрядной камере CO_2 лазера. Сравнение полученных данных с результатами работы [7] показывает, что характер зависимости $n_0 = n_0(d)$, абсолютные значения n_0 , а также значения коротковолновой границы МРИ хорошо согласуются между собой. Этот факт подтверждает возможность постро-

ния крупномасштабных излучателей МРИ, основанных на рекомендациях работы [7]. Следует отметить, что характерные значения величины n_0 , полученные в работах [11, 12], в лазерных смесях CO_2 лазера атмосферного давления с использованием в МРП вакуумных диодов составляли величину $n_0 \leq 10^7 \text{ см}^{-3}$. Причем данные значения n_0 обычно рассчитывались по экспериментальным результатам, полученным при заполнении разрядных камер тяжелыми газами, такими как Хе и Аг, обладающими гораздо большими массовыми коэффициентами ослабления μ , чем смеси CO_2 лазера. Например, для эффективной энергии квантов 50 кэВ значение μ для Аг составляет $\mu = 0.47 \text{ см}^2/\text{г}$, а для смеси $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 8$ и $1 : 1 : 0$ $\mu = 2.7 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{г}$ и $3.5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{г}$ соответственно [12].

Сравнение характеристик МРП с данными по УФ предыонизаторам (рис. 2, кривая 3) [13] показывает, что УФ предыонизатор обеспечивает одинаковые с МРП значения $n_0 \approx 10^{10} \text{ см}^{-3}$ только на расстояниях $d \approx 1 \text{ см}$. С увеличением расстояния происходит резкий спад значений n_0 , а на расстояниях $d \approx 10 \text{ см}$ УФ предыонизатор создает величину $n_0 \approx 5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ ($\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 8$, $p = 1 \text{ атм}$).

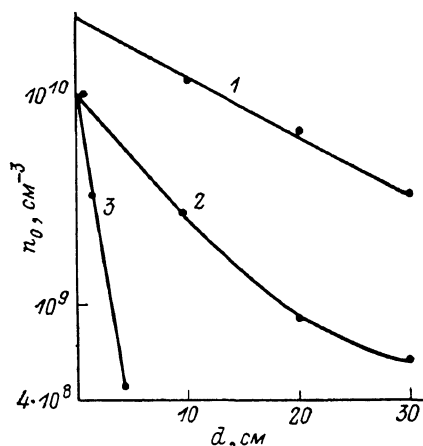


Рис. 2. Начальная концентрация электронов, образованных УФ и мягким рентгеновским излучением.

1, 2 — мягкий рентгеновский предыонизатор, 3 — УФ предыонизатор; 1 — гелий ($p = 1 \text{ атм}$); 2, 3 — смесь $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 8$ ($p = 1 \text{ атм}$).

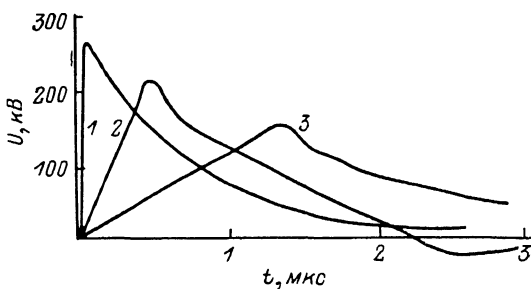


Рис. 3. Оциллограммы напряжения ГИНа на разрядном промежутке.

1 — мягкий рентгеновский предыонизатор; 2, 3 — УФ предыонизатор. Смесь $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 8$, $p = 1 \text{ атм}$, зарядное напряжение ГИНа $U = 70 \text{ кВ}$.

2. Рентгеновская предыонизация. Использование МРП позволило реализовать ОСР во всем диапазоне изменения зарядных напряжений ГИНа в газовых смесях $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 2 : 1 : 17$, $1 : 1 : 8$ при варьировании фронта импульса напряжения от $\tau_\phi = 60$ до 500 нс и задержке начала фронта напряжения относительно импульса МРИ τ_3 до 0.4 мкс . При значениях $\tau_3 \approx 0.4 \text{ мкс}$ на фотографиях ОСР на фоне однородного разряда наблюдалось большое количество нитевидных яркосветящихся каналов, прорастающих в промежуток со стороны катода на длину до 1 см . Уменьшение величины задержки $\tau_3 < 0.4 \text{ мкс}$ позволило устранить данную неоднородность. Нитевидные каналы на фотографиях ОСР отсутствовали. ОСР заполнял весь рабочий объем камеры ($30 \times 60 \times 22 \text{ см}$). Типичные оциллограммы импульсов напряжения и тока ОСР приведены на рис. 3, 4, а энергия лазерного излучения — на рис. 5.

Для проведения экспериментов с газовыми смесями, содержащими большое количество молекулярных газов для формирования ОСР, при значениях $n_0 \approx 10^9 \text{ см}^{-3}$, согласно данным работы [14], требуется величина амплитуды импульса напряжения U_m на электродах РП не меньше чем $U_m/U_{ст} \approx 1.1 - 1.3$, где $U_{ст}$ — статическое пробивное напряжение для данной смеси. Известно, что уменьшение значений возможно за счет добавки в рабочую смесь ЛВ [15]. В проведенных экспериментах в качестве ЛВ использовался триэтиламин при парциальном давлении $p = 2 \text{ Тор}$. В результате этого в смесях $1 : 3 : 6 + \text{ЛВ}$ ($p = 1 \text{ атм}$) был получен устойчивый ОСР во всем диапазоне зарядных напряже-

ний ГИНа. Однако энергия лазерной генерации уменьшалась от опыта к опыту, в разрядной камере наблюдался «туман», а прозрачность газовой среды уменьшалась. Работа МРП без включения основного напряжения не приводила к заметному изменению состава газовой смеси. По-видимому, в данном случае МРП служило катализатором плазмохимической реакции, протекающей под действием разряда накачки.

3. УФ предыонизатор. Эксперименты, проведенные с УФ предыонизатором в условиях, аналогичных разделу 2, для смеси 1 : 1 : 8 показали, что ОСР не реализуется. Тогда как при уменьшении зазора до $d=13.5$ см наблюдалось устойчивое формирование ОСР [9]. Следовательно, ионизирующей способности УФ предыонизатора оказалось явно недостаточно для межэлектродного зазора $d \approx 22$ см, т. е. в данном случае не выполняется требование к минимальному значению величины n_0 в анодной области [1]. В наших условиях затягивание фронта импульса напряжения позволяет сравнительно просто (не считая способа применения ЛВ) обойти данную трудность.

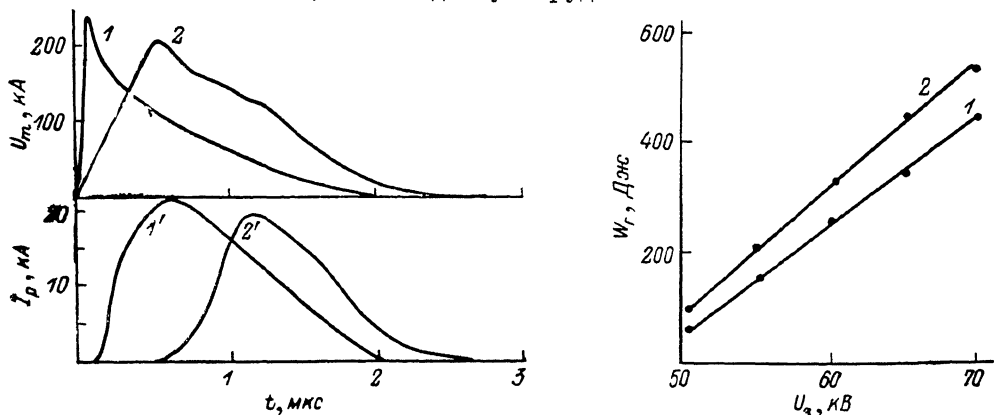


Рис. 4. Осциллограммы напряжения и тока ОСР.

1, 1' — мягкий рентгеновский предыонизатор; 2, 2' — УФ предыонизатор. Смесь $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 2 : 1 : 17$, $p=1$ атм, зарядное напряжение ГИНа $U=70$ кВ.

Рис. 5. Зависимость энергии лазерного излучения от зарядного напряжения ГИНа.

1, 2 — для смеси $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 2 : 1 : 17$ и $1 : 1 : 8$, $p=1$ атм. Энергия пересчитана для полного объема активной зоны. Объем резонатора составляет 45 % полного объема.

Известно [1, 4, 6], что устойчивое формирование объемного разряда происходит при $n_0 \approx 10^6 \text{ см}^{-3}$. Полагая, что для формирования ОСР необходимая концентрация электронов у анода составляет $n_0 \approx 10^6 \text{ см}^{-3}$, и учитывая тот факт (рис. 2, кривая 3), что на расстоянии 8–10 см от катода УФ предыонизатор обеспечивает значение $n_0 \approx 5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ (смесь 1 : 1 : 8), а характерная дрейфовая скорость электронов при значении E/ρ 5–8 кВ $\cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ составляет $v_d \approx 5 \cdot 10^6 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$, можно сделать вывод, что для заполнения электронами разрядного промежутка требуется длительность фронта напряжения $\tau_f = 400\text{--}500$ нс.

Действительно, увеличение длительности фронта напряжения до значений $\tau_f \approx 500$ нс (рис. 3, кривая 2) позволило реализовать 50%-ное формирование ОСР при максимальном значении зарядного напряжения ГИНа. На фотографии разряда в центре промежутка видны яркосветящиеся каналы длиной 8–10 см. Дальнейшее увеличение величины τ_f (рис. 3, кривая 3) позволяло формировать устойчивый ОСР при изменении зарядного напряжения в рабочих пределах 50–70 кВ. Однако на всех фотографиях разряда наблюдались незавершенные каналы, прорастающие в РП на значительные расстояния $\sim 5\text{--}6$ см. Число их существенно меньше, а поперечные размеры значительно больше, чем с использованием МРП при задержке $\tau_3 \approx 0.4$ мкс.

Таким образом, граница зажигания ОСР в случае использования предыонизатора, обеспечивающего создание величины $n_0 \approx 10^6 \text{ см}^{-3}$ в глубине разрядного промежутка, может быть оценена из выражения $\tau_f \geq (d-l)/U_0$, где l — расстояние от катода, на котором значение n_0 достигает величины $\sim 10^6 \text{ см}^{-3}$.

Максимальная длительность фронта импульса напряжения может быть определена из условия исчезновения электронов в РП, например прилипания электронов или их дрейфового выноса из РП. Определение механизма потерь электронов требует рассмотрения конкретных условий эксперимента — состава газовой смеси, скорости нарастания напряжения, мощности предыонизатора. Экспериментально установлено, что в нашем случае максимальная длительность фронта импульса напряжения определяется длительностью подсветки ($\tau_{\text{под}} \sim \sim 2$ мкс). Тогда диапазон изменения длительности фронта импульса определяется выражением

$$\frac{d-l}{u_e} \leq \tau_{\text{ф}} \leq \tau_{\text{под}}$$

Справедливость полученного критерия подтверждается результатами экспериментов для смеси 2 : 1 : 17 (рис. 4, кривые 2, 2'). В данном случае величины $\tau_{\text{ф}}$ были выбраны из условия $\tau_{\text{ф}} > (d-l)/U_e = 400$ нс, ОСР сохранял устойчивость во всем диапазоне рабочих напряжений.

В заключение отметим, что при устойчивом формировании ОСР энергия лазерного излучения совпадала с данными, полученными при использовании МРП (рис. 5).

Выводы

1. В работе впервые проведено прямое сравнение особенностей формирования ОСР в длинном промежутке ($d=22$ см) электроразрядного CO_2 лазера при использовании для предыонизации либо многоискрового УФ предыонизатора, либо рентгеновского на основе мягкого рентгеновского излучения ($E_{\text{эф}} \approx 5$ кэВ) наносекундного скользящего разряда.

2. Использование МРП позволило сформировать однородный ОСР в смеси 1 : 1 : 8 в диапазоне энерговкладов 60—125 Дж/л·атм и короткой длительности фронта импульса напряжения.

3. Эксперименты, проведенные с МРП, показали, что использование триэтилалана в качестве ЛВ исключается из-за протекания плазмохимических реакций в активном объеме лазера.

4. В режиме короткого фронта для смеси 1 : 1 : 8 УФ предыонизатор не обеспечивал устойчивой реализации ОСР.

5. Показана возможность формирования ОСР с УФ предыонизатором при затягивании фронта импульса напряжения в пределах установленного критерия. Однако однородность реализованного ОСР во всех опытах оказалась хуже, чем в случае использования МРП.

Список литературы

- [1] Карнюшин В. Н., Солоухин Р. И. Микроскопические и молекулярные процессы в газовых лазерах. М.: Атомиздат, 1981. 200 с.
- [2] Аполлонов В. В., Байцур Г. Г., Прохоров А. М., Фирсов К. Н. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 20. С. 1262—1267.
- [3] Аполлонов В. В., Байцур Г. Г., Прохоров А. М., Фирсов К. Н. // Квантовая электрон. 1987. Т. 14. № 1. С. 135—145.
- [4] Генкин С. А., Карлов Н. В., Клименко К. А. и др. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 11. С. 641—644.
- [5] Козырев А. В., Королев Ю. Д., Новоселов Ю. Н. и др. // Квантовая электрон. 1984. Т. 11 № 3. С. 524—527.
- [6] Дашук П. Н., Кулаков С. Л. // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7. Вып. 14. С. 853—857.
- [7] Дашук П. Н., Кулаков С. Л., Кучинский А. А. и др. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 1. С. 50—57.
- [8] Василевская Ю. А., Василевский М. А., Финкельштейн К. И., Янкин Е. Г. Препринт НИИЭФА. № П-К-0662. М., 1984.
- [9] Бурцев В. А., Гордейчик А. Г., Кучинский А. А. и др. // Квантовая электрон. 1988. Т. 15. № 7. С. 1376—1380.
- [10] Гейман В. Г., Генкин С. А., Королев Ю. Д. и др. // ТВТ. 1986. Т. 24. № 5. С. 857—861.
- [11] Levatter J. L., Shao-Chi Lin // Appl. Phys. Lett. 1979. Vol. 34. N 8. P. 505—509.
- [12] Alecek A. J., Knshnaswamy Jayarum // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 58. N 5. P. 1719—1727.
- [13] Seguin H. J., Tulip J., Don C., McKen // IEEE J. Quant. Elect. 1974. P. 311—319.
- [14] Жигалкин А. К., Сидоров Ю. Л. // ЖТФ. 1987. Т. 48. Вып. 8. С. 1621—1623.
- [15] Кучинский А. А., Родичкин В. А. // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 3. С. 563—566.