

03;04;10;12

О влиянии диэлектрических пленок на измерения тока пучка электронов из газовых диодов при наносекундной длительности фронта импульса напряжения

© И.Д. Костыря, В.Ф. Тарасенко

Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия
e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 2 ноября 2005 г. В окончательной редакции 21 марта 2006 г.)

Проведены исследования параметров субнаносекундных электронных пучков, формируемых в газовых диодах. Показано, что при короткой длительности фронта импульса напряжения (в данных экспериментах ~ 1 ns и менее) амплитуда регистрируемого сигнала на токовом коллекторе при вводе пучка электронов через диэлектрические пленки определяется не током пучка электронов, а электромагнитным излучением, возникающим в газовом диоде, и емкостным током с коллектора. При вводе пучка электронов через тонкие металлические фольги и густые металлические сетки зарегистрирована длительность импульса тока пучка убегающих электронов на полувысоте ~ 0.1 ns при его амплитуде в сотни ампер.

PACS: 41.85.Ar

Введение

Для вывода электронных пучков из вакуумных диодов в газ используются как металлические фольги, так и диэлектрические пленки. Применение тонких пленок из лавсана [1] или керамики [2], по сравнению с металлическими пленками, позволяет при равной механической прочности уменьшить потери тока пучка и повысить КПД ускорителя. Отметим, что диэлектрические пленки обычно используются при сравнительно больших длительностях импульса тока пучка (единицы микросекунд и более) и фронте импульса напряжения на вакуумном диоде ~ 100 ns и более [1,2]. Известно об использовании диэлектрических пленок в газовых диодах для вывода и получения пучков убегающих электронов [3–6]. Отличительной особенностью работ [3–6] является сравнительно короткая длительность переднего фронта импульса напряжения (единицы наносекунд) и регистрация в определенных условиях очень больших амплитуд и длительностей тока убегающих электронов. В [4] ток пучка убегающих электронов при малых давлениях в диэлектрических трубках превышал по амплитуде полный ток во фронте высокоскоростной волны ионизации, а в [5,6] сообщалось о получении при атмосферном давлении воздуха в газовом диоде амплитуды тока убегающих электронов в сотни ампер и длительности импульса 15–20 ns.

В недавних работах [7–10] в газонаполненных диодах был получен за металлической фольгой сверхкороткий лавинный электронный пучок (СЛЭП) с амплитудой в сотни ампер при длительности импульса на полувысоте доли наносекунды. СЛЭП был использован для формирования объемного разряда в СО-лазере атмосферного давления [11] и для возбуждения катодolumинесценции в различных кристаллах [12,13].

Цель данной работы исследовать возможность применения диэлектрических пленок для вывода субнаносекундных электронных пучков, формируемых в газовых диодах.

Экспериментальная аппаратура и методика измерений

Экспериментальные исследования были проведены с использованием трех генераторов наносекундных импульсов РАДАН-220 [14], РАДАН-303 [15] и генератора с твердотельными коммутаторами SM-3NS [16], которые подключались к газонаполненным диодам. Генератор РАДАН-220 имел волновое сопротивление 20Ω и формировал на разрядном промежутке в режиме холостого хода импульс напряжения с амплитудой ~ 220 kV, длительностью на полувысоте ~ 2 ns и переднем фронте в передающей линии ~ 0.5 ns.

Генератор РАДАН-303 имел волновое сопротивление 45Ω и формировал импульсы напряжения с длительностью на полувысоте ~ 3 ns, амплитудой на согласованной нагрузке от 85 до 200 kV (напряжение холостого хода до 400 kV) и длительностью фронта импульса напряжения в передающей линии ~ 1.2 ns.

Генератор SM-3NS подробно описан в [16,17]. После его срабатывания в передающей 50Ω линии формировался импульс напряжения амплитудой 150–160 kV, длительностью 1.4 ns и временем нарастания 250 ps. Все три генератора использовались ранее для получения электронного пучка и рентгеновского излучения в газовых диодах, а также для формирования плотных объемных разрядов [7–10, 18–20].

Газонаполненный диод во всех генераторах был образован катодом с малым радиусом кривизны и плоским анодом (рис. 1). Применялись два типа газона-

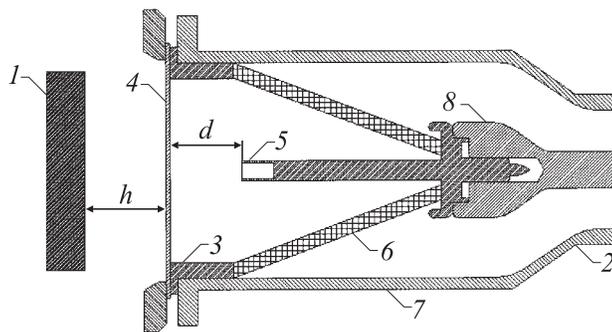


Рис. 1. Конструкция газового диода. 1 — место расположения коллектора, дозиметр и пленки РФ-3, 2 — передающая линия генератора SM-3NS, 3 — корпус газового диода, 4 — фольга или пленка из диэлектрика, 5 — катод, 6 — изолятор газового диода, 7 — корпус, 8 — центральный проводник.

полненных диодов, обычной конструкции с выводом пучка электронов через фольгу, который был подробно описан в [7–9], и открытый [19–21]. Газонаполненные диоды были изготовлены с использованием изолятора от промышленной рентгеновской трубки ИМА-350Д. Во всех экспериментах диоды заполнялись воздухом атмосферного давления. Вывод электронного пучка с первым диодом осуществляется через AlBe-фольгу толщиной $45\ \mu\text{m}$ или Al-фольгу толщиной от 10 до $150\ \mu\text{m}$. Во втором случае (открытый газовый диод) вместо фольги устанавливалась лавсановая пленка. Это приводило к замыканию разряда на внутреннюю цилиндрическую стенку диода или на ее торец. При малом зазоре между пленкой и катодом диффузный разряд замыкался на анод по поверхности пленки. В ряде экспериментов за пленкой и фольгой устанавливались сетки с различной прозрачностью. Катодом служила трубка из стальной фольги толщиной $50\ \mu\text{m}$ и диаметром $\sim 6\ \text{mm}$. Расстояние d между катодом и анодом из металлической фольги или лавсановой пленкой могло измениться от 5 до 18 mm.

Ток пучка электронов измерялся с помощью коллекторов. Коллектор № 1, представляющий собой латунный конус, образующий с корпусом коллектора линию с волновым сопротивлением $50\ \Omega$, которая соединялась с коаксиальным кабелем с волновым сопротивлением $50\ \Omega$. Основание конуса, обращенное к фольге, имело диаметр 20 mm. Данная конструкция коллектора позволяла регистрировать импульсы тока пучка с длительностью на полувысоте $\sim 0.1\ \text{ns}$. Для регистрации электрического сигнала из открытого газового диода закрытого лавсановой фольгой использовался коллектор № 2. Коллектором № 2 являлся медный диск диаметром 33 mm, устанавливаемый на расстоянии $h = 8\ \text{mm}$ от лавсановой пленки, сетки или фольги. Диск нагружался на коаксиальный кабель или одновременно на несколько коаксиальных кабелей. Данная конструкция коллектора позволяла разрешать

фронт импульса с длительностью $\sim 0.3\ \text{ns}$ и более. Полная энергия тока пучка определялась с помощью калориметра. Для регистрации импульсов напряжения использовались емкостные делители напряжения, которые устанавливались в передающей линии генератора SM-3NS [19,20] или напротив газового диода в генераторе РАДАН-303 [8]. Регистрация импульсов тока разряда осуществлялась с помощью шунта набранного из 60 малоиндуктивных сопротивлений ТВО-0.125 ($3\ \Omega$).

Для измерения сигналов с емкостного делителя, шунта и коллекторов использовались цифровые осциллографы TDS6604 (6 GHz, 20 точек на 1 ns), или TDS-684B (1 GHz, 5 точек на 1 ns), или TDS-3034 (0.3 GHz, 2.5 точки на 1 ns). Разрешение системы регистрации при использовании коллектора № 1 и осциллографа TDS6604 достигало 0.05 ns. В ряде экспериментов разрешение регистрируемых сигналов по времени ограничивалось типом используемого осциллографа (TDS-684B или TDS-3034) и(или) конструкцией коллектора № 2.

Интегральная картина свечения разряда снята фотоаппаратом ЗЕНИТ на цветную пленку и пленку РФ-3 или цифровым фотоаппаратом. Фотография разряда в открытом газовом диоде с убранной диэлектрической пленкой показана на рис. 2. Разряд является объемным, и на черно-белом изображении выделяются только яркие плазменные образования на трубчатом катоде. Рентгеновское излучение регистрировалось дозиметром Argow-Tech Inc. Model 138, который был чувствителен к излучению с энергией квантов более 16 keV. Кроме того, рентгеновское излучение фиксировалось по засветке пленки РФ-3, которая помещалась в черную бумагу толщиной $\sim 100\ \mu\text{m}$ и располагалась с торца газового диода на расстоянии 8 mm от фольги или пленки.

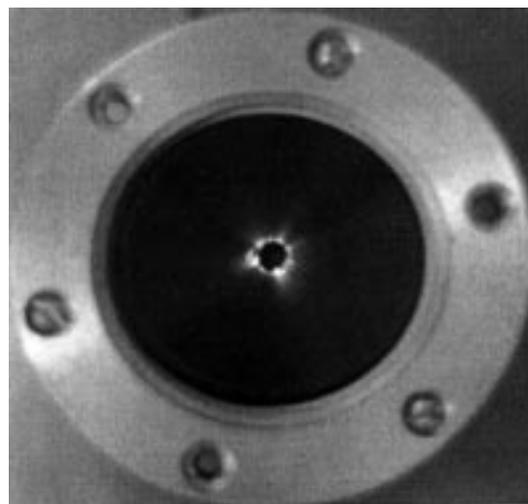


Рис. 2. Фотографии свечения разряда в воздухе при атмосферном давлении. Генератор SM-3NS, открытый газовый диод без диэлектрической пленки.

Результаты и их обсуждение

При использовании газонаполненного диода закрытого металлической фольгой были проведены измерения сигналов с емкостных делителей, коллекторов и шунта. На рис. 3, *a* показаны осциллограммы импульсов напряжения с емкостного делителя и тока пучка за AlBe фольгой, полученные при максимальном разрешении системы регистрации (50 ps между точками регистрации цифрового осциллографа) и межэлектродном зазоре $d \sim 11$ mm. Видно, что длительность импульса тока пучка на полувысоте составляет ~ 100 ps, что близко к предельному разрешению системы используемой системы регистрации. Осциллограммы тока пучка подобной формы и длительности были зарегистрированы при использовании всех трех генераторов. Оценки амплитуды тока пучка убегающих электронов по его полной энергии, длительности и распределению электронов по

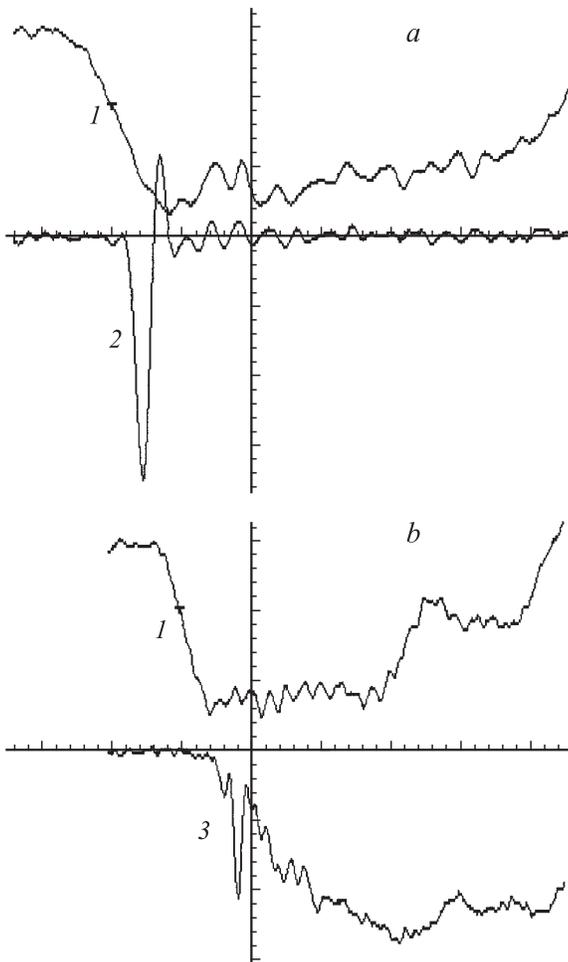


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения (1), тока пучка электронов (2) и тока разряда (3), полученные на генераторе РАДАН-303 при выводе пучка электронов через AlBe-фольгу толщиной $45 \mu\text{m}$. *a* — масштаб по горизонтали 0.5 ns/div , масштаб по вертикали 64 kV/div (1) и $\sim 50 \text{ A/div}$ (2), *b* — масштаб по горизонтали 1 ns/div , масштаб по вертикали 64 kV/div (1) и $\sim 2 \text{ kA/div}$ (3).

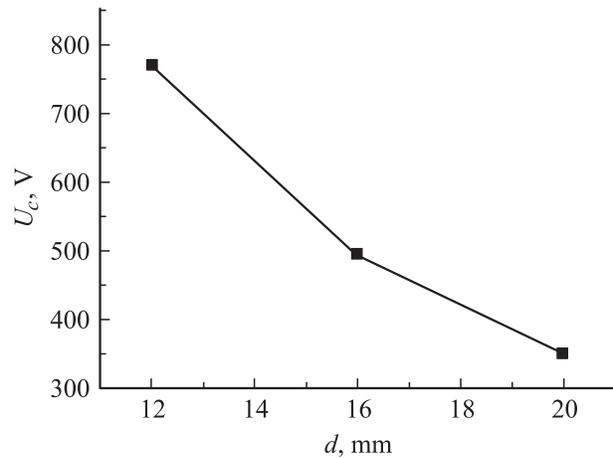


Рис. 4. Зависимость амплитуды сигнала на коллекторе № 2 от межэлектродного зазора между катодом и диэлектрической пленкой толщиной $100 \mu\text{m}$. Генератор РАДАН-220, осциллограф TDS-3034.

энергиям дают его величину в сотни ампер, как и в работах [9,10,19,20]. Отметим, что при использовании осциллографов TDS-684B и TFS-3034 длительность сигнала на полувысоте увеличивалась согласно полосе пропускания осциллографа, а его амплитуда пропорционально уменьшалась [7–9]. На рис. 3, *b* приведены осциллограммы импульса напряжения на промежутке и тока разряда с шунта. Сигнал с шунта из-за разной длины кабелей был дополнительно задержан на ~ 400 ps относительно импульса напряжения. Из анализа осциллограмм с учетом задержки видно, что импульс разрядного тока запаздывает относительно импульса напряжения на ~ 400 ps. Отметим, что амплитуда тока разряда на рис. 3, *b*, рассчитанная из напряжения холостого хода генератора с учетом напряжения, регистрируемого емкостным делителем, и из осциллограммы тока разряда отличались в ~ 1.5 раза. Это различие можно объяснить влиянием индуктивности сопротивлений ТВО, из которых был изготовлен шунт. Паразитная индуктивность могла приводить к увеличению амплитуды сигнала с токового шунта. На осциллограмме тока разряда был зарегистрирован короткий пик на фронте импульса напряжения, который исчезал при удлинении катода и замыкании промежутка проводником (режим короткого замыкания). Измерения экспозиционной дозы рентгеновского излучения в этом режиме дали следующие результаты. За один импульс при выводе пучка электронов через AlBe фольгу составила $\sim 330 \mu\text{R}$ для генератора РАДАН-220 ($h = 1 \text{ cm}$), $270 \mu\text{R}$ — для генератора РАДАН-303 ($h = 0.7 \text{ cm}$) и $160 \mu\text{R}$ — для генератора SM-3NS ($h = 2 \text{ cm}$).

При использовании газонаполненного диода закрытого диэлектрической пленкой было зарегистрировано существенное, более чем на порядок, увеличение амплитуды сигнала с коллектора по сравнению с экспериментами с фольгой. На рис. 4 приведена зависимость амплитуды сигнала с коллектора № 2 при изменении

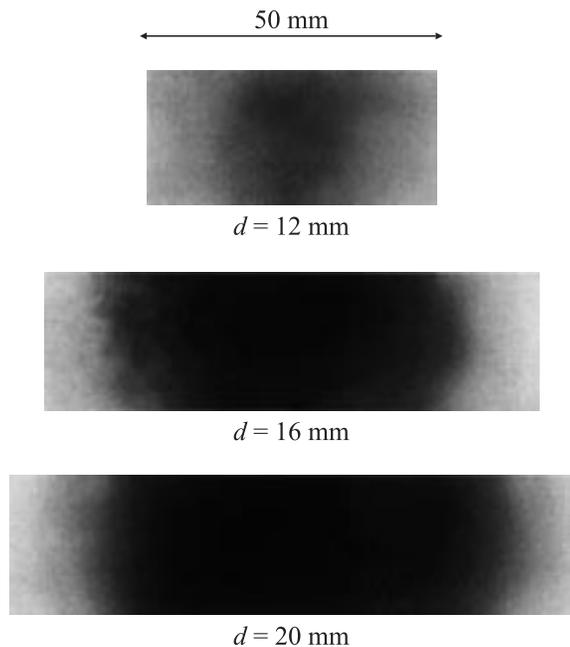


Рис. 5. Фотографии почернения фотопленки РФ-3, помещенной в черную бумагу толщиной $100\ \mu\text{m}$ при различных зазорах d между катодом и диэлектрической пленкой толщиной $100\ \mu\text{m}$. Генератор РАДАН-220.

межэлектродного расстояния между катодом и пленкой из диэлектрика. Отметим, что для условий на рис. 4, при замене диэлектрической пленки на AlBe-фольгу толщиной $45\ \mu\text{m}$, сигнал с коллектора № 2 составил $\sim 40\ \text{V}$. При увеличении толщины диэлектрической пленки, как из лавсана, так и из полиэтилена до $2\ \text{mm}$, амплитуда сигнала с коллектора практически не изменилась. При установке металлических сеток за лавсановой пленкой, амплитуда сигнала с коллектора существенно уменьшалась. Так, при геометрической прозрачности сетки с ячейкой $6 \times 6\ \text{mm}$, установленной за пленкой, 90% сигнал с коллектора уменьшился в ~ 5 раз. Тогда как при использовании этой сетки за AlBe-фольгой сигнал уменьшился всего на $\sim 10\%$.

Для дополнительной проверки причины столь большого различия в амплитудах сигналов после фольги и после диэлектрической пленки были проведены измерения экспозиционной дозы рентгеновского излучения дозиметром и сняты автографы ионизирующего излучения (рентгеновского и электронного пучка) на фотопленку РФ-3. На рис. 5 показаны фотографии засветки (почернения) фотопленки РФ-3, помещенной в черную бумагу толщиной $100\ \mu\text{m}$ для условий (рис. 4). Видно, что засветка фотопленки и диаметр автографа при $d = 12\ \text{mm}$ наименьшие, тогда как сигнал на коллекторе для этих условий наибольший (рис. 4). Измерение экспозиционной дозы с помощью дозиметра показало, что при увеличении толщины лавсановой пленки от $50\ \mu\text{m}$ до $2\ \text{mm}$ экспозиционная доза уменьшается более чем на порядок, а, как мы уже отмечали выше, амплитуда

сигнала с коллектора при этом оставалась без изменения.

Объяснить приведенные выше результаты можно влиянием мощного электромагнитного излучения, которое генерируется при подаче импульса напряжения с крутым фронтом на промежуток, и емкостного тока на процесс измерения параметров тока пучка. Емкостной ток с коллектора $I = C(dU/dt) \sim C(U_m/\tau)$ возникает при зарядке переменного конденсатора C , обкладками которого являются плазма, распространяющаяся от катода, и сам коллектор (U_m — максимальное напряжение на промежутке, τ — длительность переднего фронта импульса напряжения). Параметры сверхширокополосного электромагнитного излучения в подобных условиях были подробно исследованы в [21]. Эти факторы не были учтены в работах [4–6]. Мы не исследовали по отдельности влияние этих факторов, так как вклад каждого из них зависит от условий эксперимента, например от места положения коллектора. Однако и емкостной ток, и сверхширокополосное электромагнитное излучение увеличивают сигнал с коллектора и не позволяют корректно измерять ток пучка электронов. Для экранировки коллектора от электромагнитного излучения, возникающего при подаче наносекундных импульсов на промежуток, и отсечки емкостного тока разряда нужно закрывать газовый диод металлической фольгой или густой металлической сеткой. Как показали наши эксперименты с различными сетками, ячейка размером $< 1 \times 1$ при толщине проволоки $> 0.3\ \text{mm}$ достаточна для корректной регистрации импульсов СЛЭП в этих условиях. Так, при измерениях тока пучка за тонкими фольгами, за сеткой с прозрачностью 0.64% и размером ячейки $0.8 \times 0.8\ \text{mm}$, а также за сеткой с прозрачностью 0.14% и размером ячейки $0.2 \times 0.7\ \text{mm}$ были получены одинаковые длительности импульса на полувысоте $\sim 100\ \text{ps}$. Амплитуды тока пучка с учетом прозрачности сеток и распределения электронов по энергиям также совпадали.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показывают, что при короткой длительности фронта импульса напряжения (в данных экспериментах $\sim 1\ \text{ns}$ и менее) амплитуда регистрируемого сигнала на токовом коллекторе при выводе пучка электронов через диэлектрические пленки определяется не током пучка электронов, а электромагнитным излучением, возникающим в газовом диоде, и емкостным током с коллектора. Для регистрации пучков электронов в этих условиях вместе с диэлектрическими пленками необходимо использовать металлические сетки с размером ячейки $< 1 \times 1\ \text{mm}$. При использовании для вывода тока пучка из диода, заполненного воздухом атмосферного давления, фольги (Al или AlBe) и металлических сеток с прозрачностью 64 и 14% на генераторах РАДАН-220, РАДАН-303

и SM-3NS зарегистрирована длительность импульса тока пучка убегающих электронов на полувьсоте ~ 0.1 ns. Амплитуда тока пучка зависела от многих параметров и при малых размерах, гладкой внутренней поверхности и малой индуктивности газового диода составила сотни ампер.

Авторы благодарят В.Г. Шпака и С.Н. Рукина за предоставление генераторов, а С.К. Любутина, Б.Г. Словиковского и С.А. Шунайлова — за помощь при проведении данной работы.

Список литературы

- [1] Бычков Ю.И., Иванов Н.Г., Коновалов И.Н. и др. // Квант. электрон. 1983. Т. 10. № 7. С. 1510–1512.
- [2] Ulrich A., Niebl C., Tomizawa T. et al. // Proc. SPIE. 1999. V. 4071. P. 2–8.
- [3] Абрамов А.Г., Асиновский Э.И., Василяк Л.М. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. Вып. 8. С. 979–986.
- [4] Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Филигин И.В. // УФН. 1994. Т. 164. № 3. С. 263–286.
- [5] Королев В.С., Мальцев А.Н. // Изв. вузов. Физика. 1992. № 2. С. 7–9.
- [6] Королев В.С., Мальцев А.Н. // Изв. вузов. Физика. 1993. № 6. С. 67–70.
- [7] Алексеев С.Б., Губанов В.П., Орловский В.М. и др. // ПТЭ. 2003. № 4. С. 81–84.
- [8] Тарасенко В.Ф., Алексеев С.Б., Орловский В.М. и др. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 8. С. 30–34.
- [9] Алексеев С.Б., Губанов В.П., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 20. С. 35–41.
- [10] Tarasenko V.F., Skakun V.S., Kostyrya I.D. et al. // Laser and Particle Beams. 2004. V. 22. N 1. P. 75–82.
- [11] Алексеев С.Б., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. // Квант. электрон. 2003. Т. 33. № 12. С. 1059–1061.
- [12] Липатов Е.И., Тарасенко В.Ф., Орловский В.М. и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 6. С. 29–33.
- [13] Липатов Е.И., Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Алексеев С.Б. // Квант. электр. 2005. Т. 35. № 8. С. 745–748.
- [14] Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шпак В.Г. и др. // ПТЭ. 1989. № 2. С. 146–149.
- [15] Яландин М.И., Шпак В.Г. // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5–31.
- [16] Любутин С.К., Рукин С.Н., Словиковский Б.Г., Цыранов С.Н. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 5. С. 36–46.
- [17] Аличкин Е.А., Любутин С.К., Пономарев А.В. и др. // ПТЭ. 2002. № 4. С. 106–111.
- [18] Алексеев С.Б., Губанов В.П., Костыря И.Д. и др. // Квант. электр. 2004. Т. 34. № 11. С. 1007–1010.
- [19] Тарасенко В.Ф., Любутин С.К., Словиковский Б.Г., Костыря И.Д. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 14. С. 88–94.
- [20] Тарасенко В.Ф., Любутин С.К., Рукин С.Н. и др. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 11. С. 69–74.
- [21] Андреев Ю.А., Костыря И.Д., Кошелев В.И., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 5. С. 105–111.