

04;12

Некоторые результаты визуальных исследований излучения магнитоплазменного компрессора в атмосфере

© Ю.Я. Волколупов, М.А. Красноголовец, М.А. Острижной, В.Г. Нестеренко, О.И. Харченко, В.И. Чумаков

Харьковский государственный технический университет электроники,
Харьков, Украина

(Поступило в Редакцию 10 октября 2000 г.)

Описан эффективный источник импульсного электромагнитного излучения в диапазоне 0.3–10.2 μm . Приведены параметры установки и результаты исследований характеристик излучения.

Плазменные источники электромагнитного излучения обладают высокими электрическими показателями эффективности. Известно, что мощность излучения, плотность и температура плазмы в таких источниках зависят от энергии, вкладываемой в разряд, и, следовательно, от разрядного тока [1–4]. Исследования пространственного распределения температуры в области разряда позволяют оптимизировать параметры энергетической установки и конструкцию излучателя с целью получения максимальной эффективности излучения.

В экспериментальных установках по генерации и ускорению плотной плазмы в качестве энергопитания используются емкостные накопители. В этом случае максимальная величина тока ограничивается влиянием индуктивности конденсаторов и паразитной индуктивности монтажа (шинопроводов, связывающих электроды конденсаторов и плазменного ускорителя). Минимизация индуктивности позволяет реализовать режим разряда накопителя, близкий к апериодическому, и приблизиться к максимально возможным величинам разрядных токов экспериментальных установок.

В данной работе рассмотрены результаты экспериментальных исследований источника мощного импульсного излучения на основе коаксиального магнитоплазменного компрессора (МПК) торцевого типа. Приведены экспериментальные зависимости параметров экспериментальной установки, собранной по бесшинной схеме, что позволяет получить высокие показатели эффективности излучения. Приведены зависимости параметров излучения и результаты исследований характеристик излучения в оптическом диапазоне волн.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Электроды коаксиального МПК располагались на металлических листах, которые соединялись с соответствующими электродами конденсаторов накопителя. Заряд накопителя от мощного выпрямителя позволял получать напряжения в диапазоне 2–3.6 кВ. Запуск установки производился от вспомогательного источника плазмы (форплазмы), электрод которого располагался аксиально внутри центрального электрода МПК. При разряде на него дополнительного конденсатора $C_f = 60 \mu\text{F}$ форплазма, образующаяся

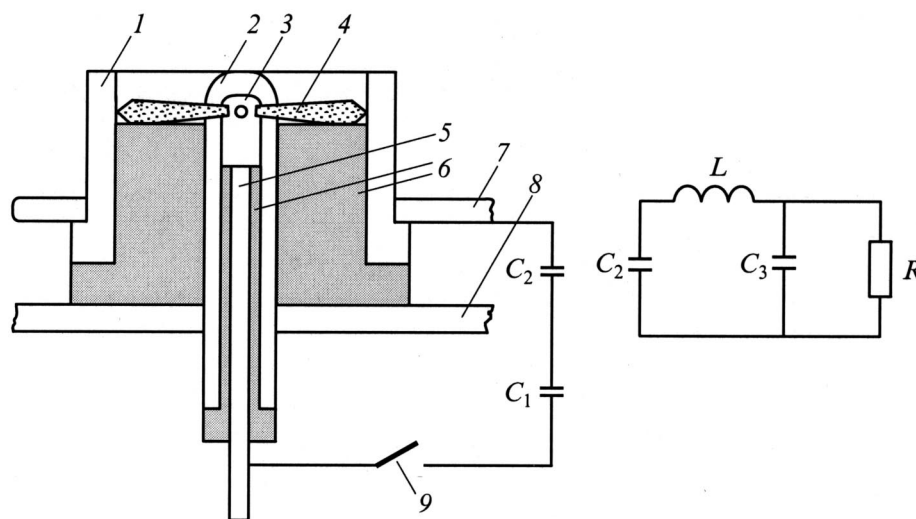


Рис. 1. Схема МПК с напуском форплазмы: 1 — внешний электрод, 2 — центральный электрод, 3 — камера К1 формирования форплазмы, 4 — плазменные струи, 5 — дополнительный электрод, 6 — фторопластовые изоляторы, 7 — листовой электрод накопителя — анод, 8 — листовой электрод накопителя — катод, 9 — разрядник.

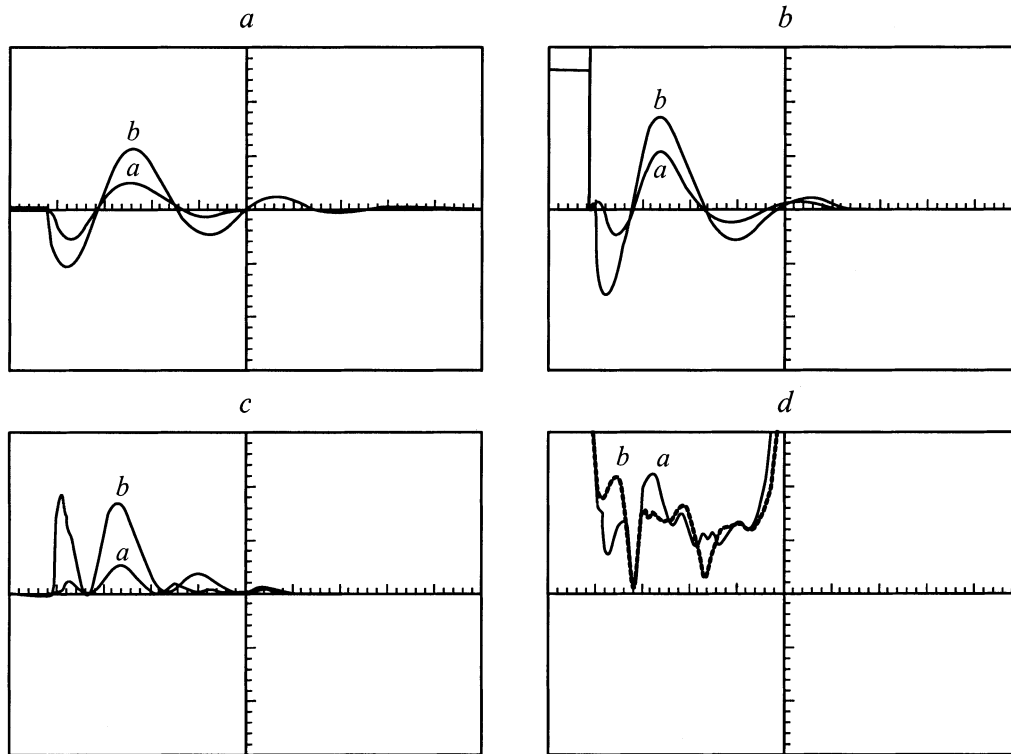


Рис. 2. Типовые осциллограммы тока разряда (a — 325 кА/дел., 20 μ с/дел.), напряжения на нагрузке (b — 0.75 кВ, 20 μ с/дел.) мгновенной мощности (c — 250 МВт/дел., 20 μ с/дел.) и сопротивления (d — 2.35 м Ω /дел., 20 μ с/дел.) при напряжениях накопителя 2.0 (a) и 3.2 кВ (b).

внутри камеры $K1$, под действием газокINETического давления выбрасывается через отверстия в центральном электроде МПК в виде отдельных струй в разрядный промежуток. Энергия заряженных частиц форплазмы достаточна для перекрытия разрядного промежутка, так что в результате происходит разряд емкостного накопителя. Из отдельных плазменных струй формировалась однородная плазменная шайба, из которой затем образовывалась токово-плазменная оболочка, характерная для МПК торцевого типа. Полярность электродов МПК выбиралась в соответствии с рекомендациями [3].

Параметры экспериментальной установки следующие: емкость накопителя 1400 μ F, зарядное напряжение 2–3.6 кВ, разрядный ток 200–400 кА, индуктивность разрядного контура 8.75 нГн, максимальная мощность излучения 55 МВт, длительность импульса тока 22 μ с.

Рассмотрим результаты измерений характеристик источника. На рис. 2 приведены временные диаграммы разрядного тока емкостного накопителя (a) и напряжения на электродах МПК (b). Как видно разряд носит колебательный характер с большим декрементом затухания, значение которого составляет $\ln I_m(t)/I_m(t+T) \cong 1.39$. На основании временных диаграмм $i(t)$ и $u(t)$ можно построить зависимости мгновенной мощности $p(t) = u(t)i(t)$ и сопротивления $r(t) = u(t)/i(t)$ (рис. 2, c, d). при построении этих графиков была сделана коррекция искажений, вносимых

параметрами резистивно-емкостного делителя напряжения, постоянная времени которого $\sim 10 \mu$ с соизмерима с длительностью исследуемых процессов. Как видно, мгновенная мощность остается положительной, следовательно, сопротивление в процессе разряда имеет активный характер.

Зависимости тока разряда от напряжения зарядки накопителя U_2 и от величины накопленной энергии

$$W_2 = \frac{1}{2}CU_2^2$$

приведены на рис. 3. Ток возрастает линейно с напряжением, т.е. можно считать, что интегральное сопротивление разрядного контура, равное $R = \Delta U / \Delta I \cong 9.4 \cdot 10^{-3} \Omega$, и средняя мощность потерь в исследуемом диапазоне энергий остаются постоянными. Величину тока можно также оценить, интегрируя первый полупериод осциллограммы тока рис. 2, a и сравнивая результат с зарядом, накопленным в емкости. Отсюда

$$I_m = \frac{CU_2}{\int_0^{\tau_1} f(t) dt},$$

где τ_1 — длительность первого полупериода тока; $f(t)$ — функция, описывающая временную зависимость тока. Значения, рассчитанные для выбранных величин заряд-

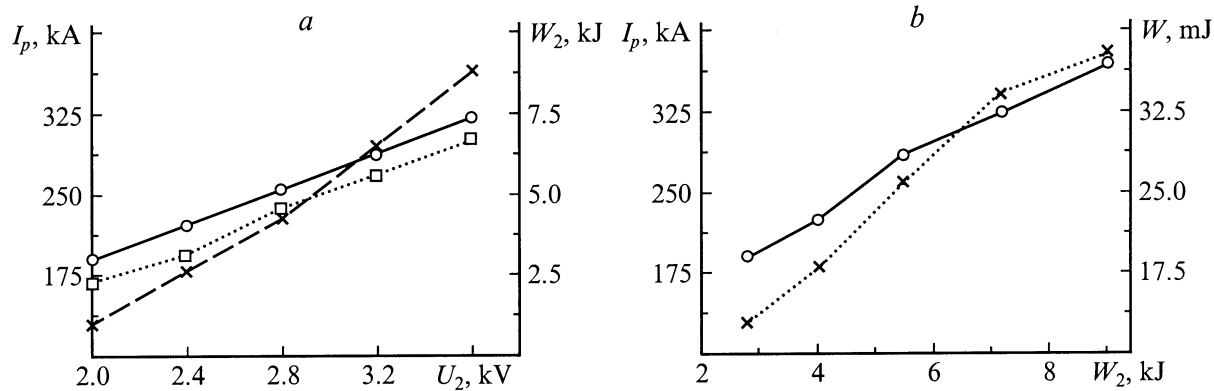


Рис. 3. Зависимости тока нагрузки (расчет — сплошная кривая, эксперимент — значки) и накопленной энергии (штриховая кривая) от зарядного напряжения (а), зависимость тока нагрузки и плотности потока энергии оптического излучения от накопленной энергии (б).

ного напряжения в предположении, что первый полупериод тока имеет вид $i(t) = I_m \sin \omega t$, также показаны на рис. 3.

Регистрация энергии излучения в диапазоне $0.3 \leq \lambda \leq 10.2 \mu\text{m}$ осуществлялась с помощью измерителя мощности лазерного излучения ИМО-2Н. На рис. 3 приведена зависимость плотности потока энергии излучения на расстоянии 1 м от источника от зарядного напряжения и накопленной энергии. Перегиб кривой и снижение степени роста энергии излучения можно объяснить сдвигом максимума кривой распределения температуры (кривой Планка) излучающего плазменного образования в ультрафиолетовую область и выходом за пределы полосы пропускания прибора при увеличении энергии, вкладываемой в разряд, что приводит к соответствующему росту температуры плазмы. Значение разрядного тока при этом составляет $I_p \cong 260 \text{ kA}$. При таком токе магнитное давление $(\mu H^2)/2$ (где H — напряженность магнитного поля, создаваемого током) значительно превышает газокинетическое давление плазменного столба $\sim 2nkT$ (где n — концентрация электронов в разрядном столбе, k — постоянная Больцмана, T — температура), что приводит к образованию перетяжек и неустойчивости и формированию плазменного фокуса (ПФ) [1–5]. Оценку температуры можно получить, используя соотношение Беннета для равновесного случая при учете только азимутального магнитного поля, создаваемого разрядным током,

$$\frac{\mu H_p^2}{2} = 2nkT,$$

где предполагается равномерное распределение плотности заряженных частиц по сечению плазменного столба, $H_p = I_p/2\pi r_p$ — магнитное поле на границе плазменного столба радиусом r_p . Подставляя $r_p = 1 \text{ cm}$, $n = 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, получим $T \cong 7.8 \cdot 10^4 \text{ K}$.

Энергия излучения высокотемпературной области для данной температуры и плотности составляет величину

порядка 102 J. Оценка полной энергии излучения получается интегрированием плотности потока по пространственной диаграмме направленности излучателя и составляет $W_1 = 1.744 \text{ kJ}$. Таким образом, КПД излучателя равен 0.19. При этом предполагалось, что распределение излучения пропорционально площади сечения ПФ в азимутальной и меридиональной плоскостях в 2π -пространстве.

Пространственное распределение температуры в области разряда и эффекты, сопровождающие сильноточный разряд МПК, можно оценить на основании фотографий, выполненных с применением оптических фильтров (рис. 4). Как видно, наиболее высокотемпературная область разряда локализована вблизи торца центрального электрода и имеет веретенообразную форму, характерную для образования ПФ [2,3]. Верхняя граница полосы пропускания фильтра УФС-6 равна 410 nm, поэтому реализация ПФ представляется весьма вероятной. Кроме того, разряд сопровождается мощной ударной волной на выходе плазменного ускорителя.

Использование фильтров с более низкочастотной характеристикой пропускания показывает, что области с меньшей температурой имеют большие размеры и в красной области спектра разряд имеет диффузный характер. На рис. 4, а отмечаются эффекты интенсивной эрозии центрального электрода, т.е. температура металла, выбрасываемого при эрозии $T_1 < 5500 \text{ K}$. В некоторых случаях разряд имел асимметричную форму в результате неравномерного выброса форплазмы в разрядный промежуток.

Наиболее отчетливо пространственное распределение температуры в области разряда видно на рис. 4, а. Можно выделить четыре характерные области: 1) высокотемпературная область ПФ на торце центрального электрода, примерно равная его диаметру d и имеющая высоту порядка $(2-2.5)d$; 2) внутренняя область в межэлектродной части, занимающая наибольший объем и охватывающая ПФ; 3) область токово-плазменной оболочки; 4) внешняя низкотемпературная область ра-

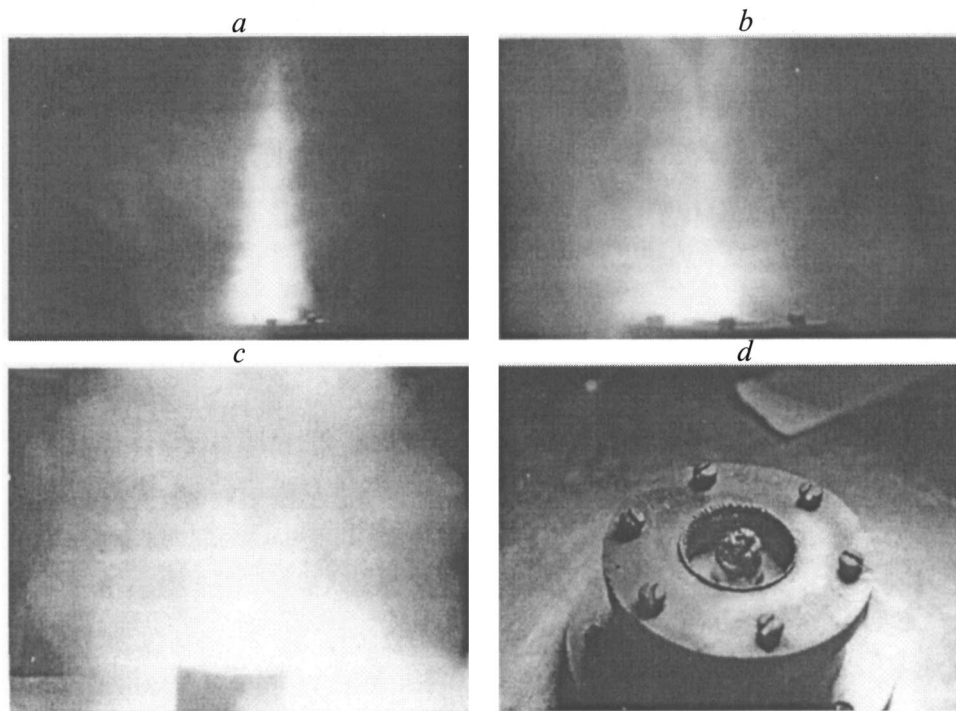


Рис. 4. Сильноточный разряд МПК. Фильтры: *a* — ТС-2, *b* — НС-10, *c* — НС-13, *d* — внешний вид электродов МПК.

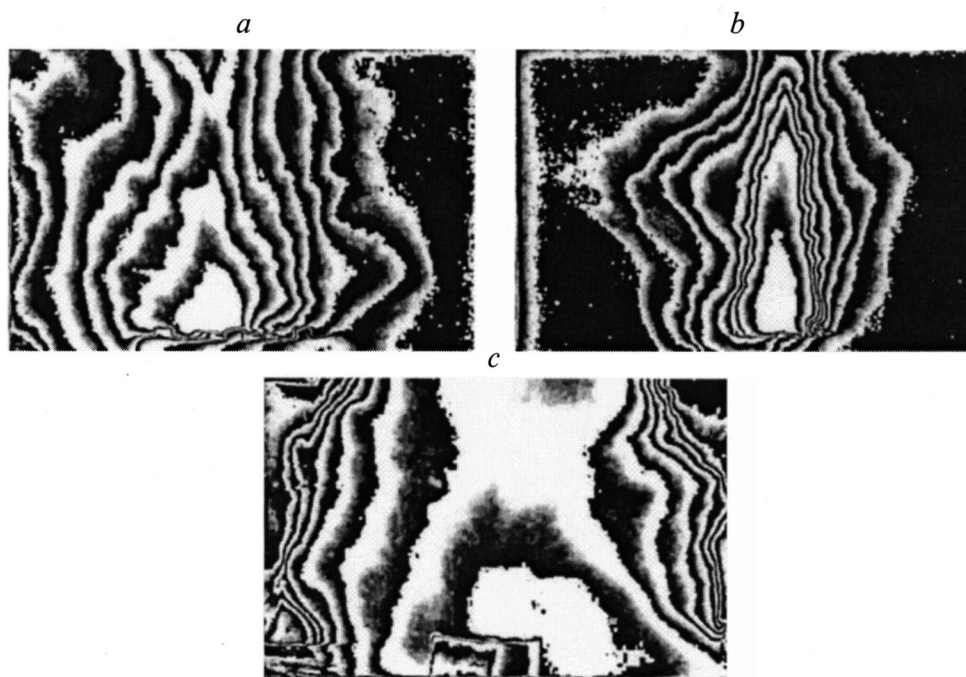


Рис. 5. Качественная картина пространственного распределения температуры в области разряда. *a–c* соответствуют рис. 4, *a–c*.

зогретого газа, состоящего в основном из нейтральных молекул.

Детальная картина пространственного распределения температуры приведена на рис. 5. Для визуализации областей разряда с различной температурой был применен алгоритм поиска линий равной яркости изображе-

ния и последующая обработка фотографий с помощью ПЭВМ (программного пакета Corel PhotoPaint). С помощью такой обработки можно выделить достаточно широкий спектр яркостных градаций разряда, которые фактически представляют собой изотермы температурного распределения.

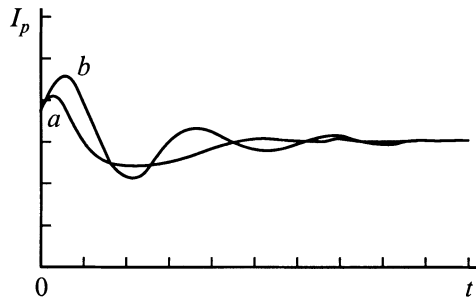


Рис. 6. Вид тока разряда в схеме с форсирующей емкостью: *a* — для апериодического процесса, *b* — для колебательного процесса.

Среди путей повышения мощности импульсного оптического излучения можно выделить два направления. К первому относятся способы повышения мощности излучения в импульсе за счет увеличения емкости накопительного элемента C_2 и/или увеличения зарядного напряжения U_2 на накопительном элементе (т.е. увеличение энергии импульса). Ко второму относятся способы, предусматривающие укорочение импульса излучения при неизменной энергии, вкладываемой в разряд. Эти способы включают в себя уменьшение паразитной индуктивности накопительного элемента и токоведущих частей конструктивными решениями, в частности применением конденсаторов с малой индуктивностью и токоведущих частей, выполненных в виде металлических листов; подбор формы и материала электродов, обеспечивающих минимальное сопротивление плазмы в области разряда; применение форсирующих емкостей в накопителе.

Кратко опишем способ с применением форсирующих емкостей. Форсирующая емкость представляет собой конденсатор (конденсаторы) с малой индуктивностью, включаемый (включаемые) параллельно основным конденсаторам накопителя как можно ближе к МПК. Емкость форсирующих конденсаторов выбирается из условия $C_4 = (0.001 \dots 0.01)C_2$. При этом разрядная цепь представляет собой цепь третьего порядка. Решение дифференциального уравнения для данной цепи в предположении, что плазма разряда имеет активное сопротивление $R_p = \text{const}$ (что для систем с форплазменным поджигом в начальной стадии разряда соответствует действительности), приводит к следующим результатам:

а) процесс апериодический, разрядный ток $I_{p(t)}$ описывается уравнением

$$I_{p(t)} = K_1 e^{-\alpha t} + K_2 e^{-\beta t} + K_3 e^{-\gamma t},$$

где $K_1, K_2, K_3, \alpha, \beta, \gamma$ — константы, зависящие от начальных условий и элементов цепи;

б) процесс колебательный, разрядный ток $I_{p(t)}$ описывается уравнением

$$I_{p(t)} = K_1 e^{-\alpha t} \sin \beta t + K_2 e^{-\alpha t} \cos \beta t + K_3 e^{-\gamma t},$$

где $K_1, K_2, K_3, \alpha, \beta, \gamma$ — константы, также зависящие от начальных условий и элементов цепи. Вид разрядного

тока для двух случаев (апериодический и колебательный процессы) представлен на рис. 6. Как видно, в начальный момент времени для рассматриваемой цепи не равен нулю, а составляет некоторую величину I_0 , определяемую емкостью форсирующего конденсатора и начальным количеством ионизированных частиц в разрядном промежутке. При этом в начальный момент времени происходит ионизация и начальный разогрев газа в разрядном промежутке, таким образом скорость нарастания разрядного тока оказывается выше, чем в системах без форсирующей емкости.

Разработанный и созданный источник широкополосного оптического излучения плазмы при сильноточном разряде в атмосфере позволяет получать импульсы мощностью до 55 МВт. Эффективность источника составляет величину порядка 19% энергии, вкладываемой в разряд. Применение безыиновой системы соединения электродов МПК с конденсаторами накопителя позволило реализовать короткие импульсы тока $\sim 20 \mu\text{s}$ и повысить мощность излучения. Получены результаты фотографических исследований излучения сильноточного разряда в различных областях оптического спектра, что позволяет проводить анализ пространственного распределения излучения области разряда и оценить пространственное распределение температуры. Полученные результаты могут служить основой достаточно простой методики качественной оценки распределения температуры плазмы при сильноточных высоковольтных импульсных разрядах.

Список литературы

- [1] Козлов Н.И. // ТВГ. 1973. Т. 11. № 1. С. 191–193.
- [2] Зворыкин В.Д., Камруков А.С., Клементов А.Д. и др. // Квантовая электрон. 1977. Т. 4. № 2. С. 290–300.
- [3] Камруков А.С., Козлов Н.П., Протасов Ю.С. // Письма в ЖТФ. 1975. Т. 1. Вып. 9. С. 419–422.
- [4] Плазменные ускорители и ионные инжекторы / Под ред. И.П. Козлова, А.И. Морозова. М., 1984. 271 с.
- [5] Шостко С.Н., Шостко И.С., Лонин Ю.Ф. и др. // Материалы 7-й Международной Крымской конф. "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии" (КрымМико97). Севастополь, 1997. Т. 1. С. 271–274.