

УДК 537.523.4

ФИЗИКА

Р. П. Баберцян, Э. С. Бадалян, Г. А. Егнязрян, Э. А. Тер-Геворкян

О стимулировании ВЧ-колебаний и их влиянии на энергию аномальных электронов в пеннинговском разряде переменной длины

(Представлено чл.-корр. АН Армянской ССР Д. М. Седракяном 17/VII 1989)

Данная работа посвящена дальнейшему изучению разряда с осциллирующими электронами в связи с возможностью использования его в современных направлениях науки и техники в качестве источника заряженных частиц (¹⁻²). Эффективная работа источника зависит от того, насколько удастся снизить энергетические затраты для получения пучка ионов или электронов с заданными параметрами. Достижение поставленной цели тесно связано с нахождением оптимального режима работы газоразрядной ячейки. В связи с этим ряд предыдущих работ авторов (³⁻⁷) был посвящен поискам некоторого оптимального режима диапазона физических и геометрических параметров газоразрядного источника, обеспечивающих выполнение этой задачи. В работах (⁸⁻⁹) показано, что в определенной области значений геометрических параметров разряд становится нестабильным. Об этом свидетельствовал ряд экспериментальных фактов, в том числе и появление аномальных электронов за отверстием в центре катода.

В работах (⁹⁻¹⁰) авторы выход аномальных электронов за отверстием в центре катода объясняют появлением ВЧ-колебаний, обусловленных развивающейся при определенных параметрах разряда неустойчивостью диокотронного типа. Установлено, что эффективность выхода потоков электронов в значительной степени зависит от геометрических параметров разрядного промежутка.

Главное внимание в настоящей работе уделено выяснению влияния длины разрядного промежутка на режим горения разряда при данных условиях и возможность стимулирования в нем ВЧ-колебаний с целью инициирования эффективного выхода потока электронов за отверстие в центре катода вдоль магнитного поля без применения каких-либо электроннооптических систем. Опираясь на предыдущие исследования (⁴⁻⁶), авторы выбрали те ячейки Пеннинга, в которых наиболее четко проявилось различие режимов горения разряда.

Экспериментальные данные настоящей работы свидетельствуют о важной роли относительной длины разрядного промежутка $l_{отн}$ равной отношению длины разрядного промежутка l к диаметру анода d , в развитии неустойчивостей диокотронного типа и подтверждают механизм появления аномально быстрых электронов за отверстием катода, предложенный авторами в работе (⁹).

Принципиальная схема разрядного промежутка типа Пеннинга по-

казана на рис. 1, а. Она представлена цилиндрическим анодом 1, двумя катодами по обеим сторонам цилиндрического анода, один из которых (3) неподвижный с осевым отверстием, а другой (2) подвижный.

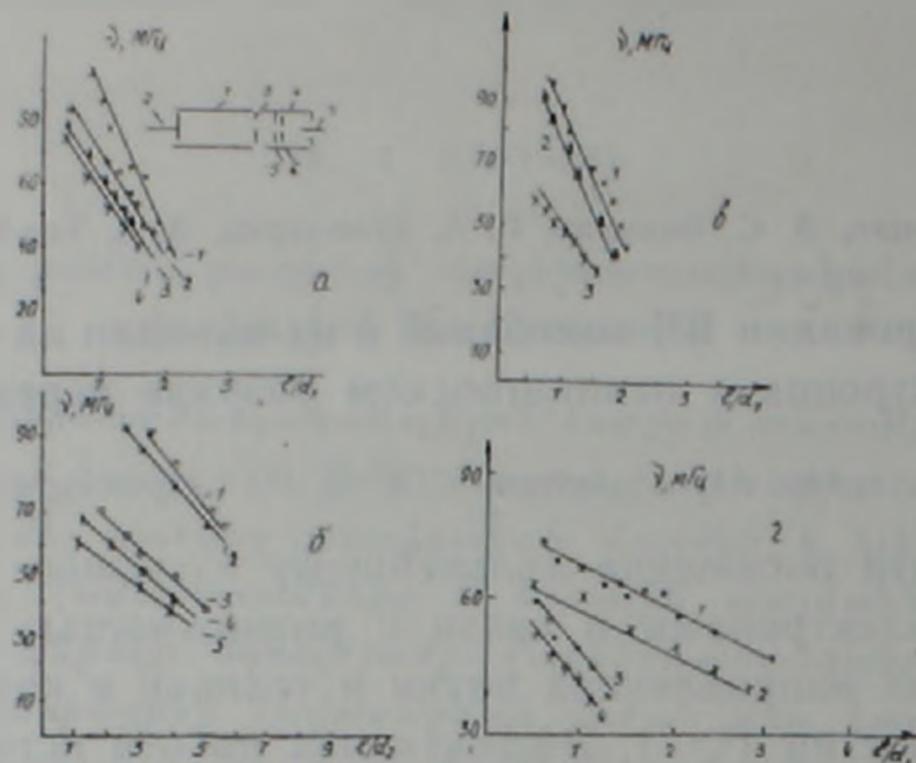


Рис. 1. Принципиальная схема разрядного промежутка. Зависимости частоты ВЧ-колебаний переменной компоненты разрядного тока от относительной длины разрядного промежутка для ячеек диаметров d_1 и d_2 (а, б, в), $d_1 < d_2$, $U_a = 3$ кВ, $p = 4 \cdot 10^{-4}$ торр, V (Гц): а) 1—1210, 2—1430, 3—1540, 4—1650; б) 1—1100, 2—1210, 3—1230, 4—1540, 5—1760; в) $V = 1210$ Гц, U_a (кВ): 1—3, 2—2, 3—1,5; г) $U_a = 1,5$ кВ, p (торр): 1,2— $5 \cdot 10^{-5}$, 3,3— $4 \cdot 10^{-4}$, V (Гц): 1,5—1100, 2,4—1320

К неподвижному катоду примыкает коллектор 4, внутри которого располагаются центральный электрод 7, сетки 5 и 6, изолированные от корпуса коллектора и друг от друга. Сетки предназначены для подавления электронов при измерении ионного тока пучка и ионов при измерении электронного тока. Центральный электрод 7 служит для измерения осевого компонента тока пучка заряженных частиц. Энергию электронов определяли методом задерживающего потенциала, подаваемого с некоторым смещением на сетки 5 и 6. Для получения информации о существовании ВЧ-колебаний в прианодном слое и связанном с ним появлении аномальных электронов снимаемое с сопротивления напряжение в цепи разрядного тока подавалось на вход анализаторов спектра СКЧ—5, СКЧ—8, СКЧ—59. Просматривались спектрограммы колебаний в диапазоне от 1 до 100 МГц. Колебания в разряде изучались в зависимости от относительной длины разрядного промежутка $l_{отн}$, которую плавно меняли в горящем разряде с помощью специального устройства. Для выяснения природы колебаний при фиксированной длине разрядного промежутка меняли физические параметры разряда.

Данные экспериментов приведены на рис. 1—4. Из экспериментальных зависимостей $\nu = f(l_{отн})$ (рис. 1 а, б, в) видно, что $l_{отн}$ при которой наступает неустойчивое состояние, различна. Из тех же зависимостей следует, что при $p = \text{Const}$ частота колебаний уменьшается с

ростом $I_{отн}$ для всех значений анодного напряжения U_a и магнитной индукции B измеренного интервала. $I_{отн}$, при которой возникают неустойчивости, зависит также и от давления (рис. 1,з). Она уменьшается с ростом давления, уменьшается и величина частоты колебаний.

Экспериментальные зависимости частоты ВЧ-колебаний разрядного тока от индукции магнитного поля B при различных анодных напряжениях и давлении $p=4 \cdot 10^{-4}$ торр приведены на рис. 2. Видно, что эти зависимости соответствуют диэктронным колебаниям, частота которых является функцией напряженности радиального электрического поля E_r и индукции магнитного поля $B: \nu \sim \frac{E_r}{B}$.

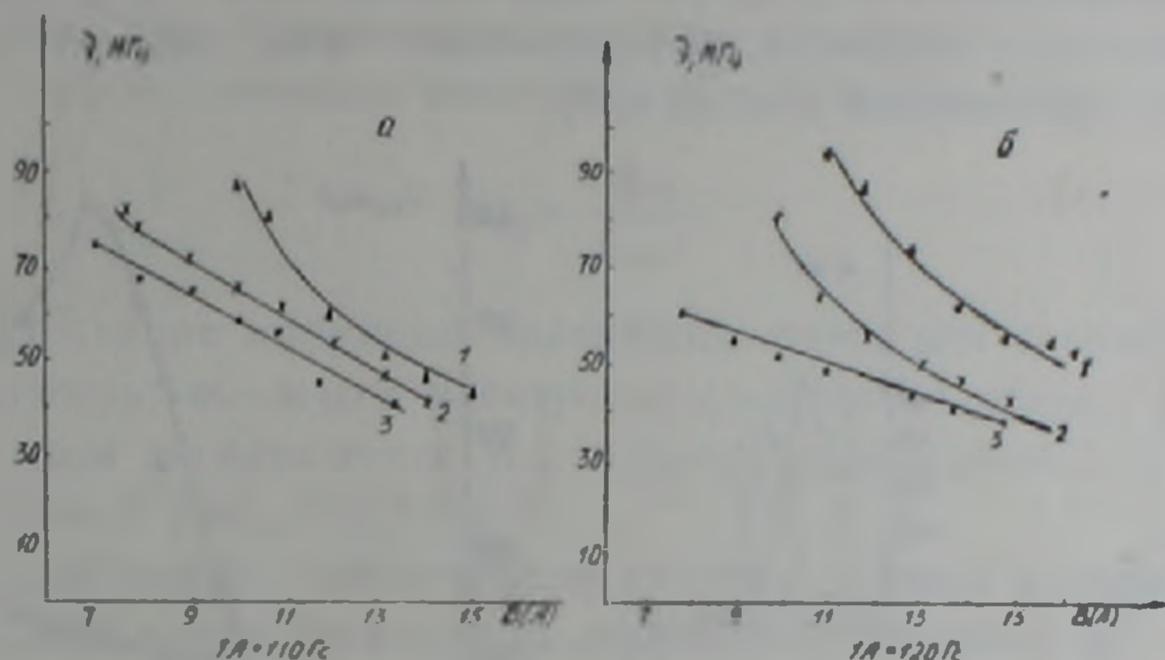


Рис. 2. Зависимость частоты ВЧ колебаний переменной компоненты разрядного тока от индукции магнитного поля при $p=4 \cdot 10^{-4}$ торр для двух разрядных промежутков: а) $l/d_1=1$ отн. ед., б) $l/d_2=2$ отн. ед., U_a (кВ): 1—3, 2—2, 3—1,5

На рис. 3 представлены значения энергий электронов, вышедших из отверстия в центре неподвижного катода, в зависимости от относительной длины разрядного промежутка. Из них следует, что при данных условиях поток приосевых электронов не является моноэнергичным. Интервал измеренных энергий электронов лежит в пределах $20 \div 280$ эВ. Были обнаружены электроны с энергией до 400 эВ (на графике не приведены). При магнитных полях, больших критического, выход электронов с аномально большой энергией, как видно из рис. 3, а, зарегистрирован для коротких разрядных промежутков. Однако при полях, меньших $B_{кр}$, при прочих тех же условиях таких электронов не наблюдалось. С ростом относительной длины разрядного промежутка энергия электронов уменьшается. Наиболее интенсивные ВЧ-колебания также регистрировались для тех же разрядных промежутков (рис. 3, б). Выход аномальных электронов одновременно с ВЧ-колебаниями говорит о наличии общей причины их рождения и подтверждает предложенный авторами механизм их возникновения⁽⁸⁾.

Таким образом, интервал длин $l_{отн}$, при которых разряд находится в неустойчивом состоянии, зависит не только от физических, но и от геометрических параметров (рис. 1, а, б). Именно этим можно объяснить факт отсутствия ВЧ-колебаний при тех же значениях физических параметров в ячейке меньшего диаметра, но с постоянной дли-

ной разрядного промежутка (⁹), большей критической относительной длины $l_{\text{отн.кр}}$, т. е. той длины, при которой разряд переходит в неустойчивое состояние.

Возможность установления условий, при которых инициируются ВЧ-колебания, была получена благодаря плавному изменению длины разрядного промежутка исследуемой ячейки. Из рис. 1 а, б видно, что с ростом индукции магнитного поля при $U_a = \text{Const}$ и $p = \text{Const}$ предельное значение $l_{\text{отн.кр}}$ смещается в сторону коротких $l_{\text{отн.}}$, с ростом же анодного напряжения при $B = \text{Const}$ и $p = \text{Const}$ — в сторону больших (рис. 1, в).

Экспериментальные зависимости $v = f(B)$ и $l_{\text{отн.}} = \text{Const}$ показывают, что критическое значение магнитного поля $B_{\text{кр}}$, при котором возникают неустойчивости диокотронного типа, зависит от величины объемного промежутка (рис. 2, а, б).

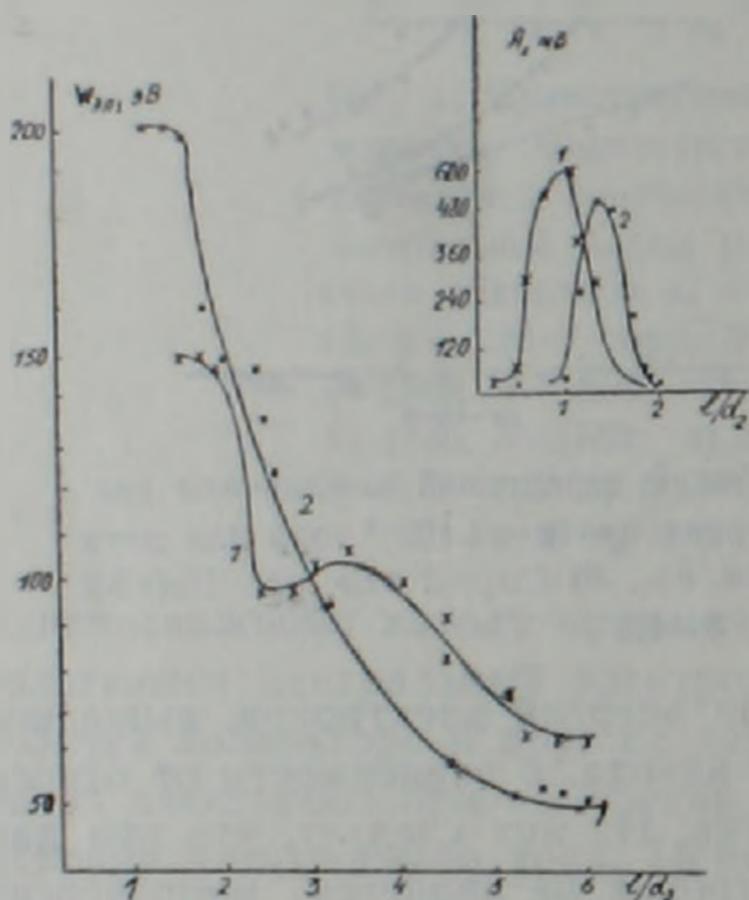


Рис. 3. Зависимость энергии электронов, вышедших из осевого отверстия в центре катода и амплитуды ВЧ-колебаний, от относительной длины разрядного промежутка при $p = 5 \cdot 10^{-4}$ торр, $B = 1500$ Гс, U_a (кВ)
1—1,2; 2—2,4

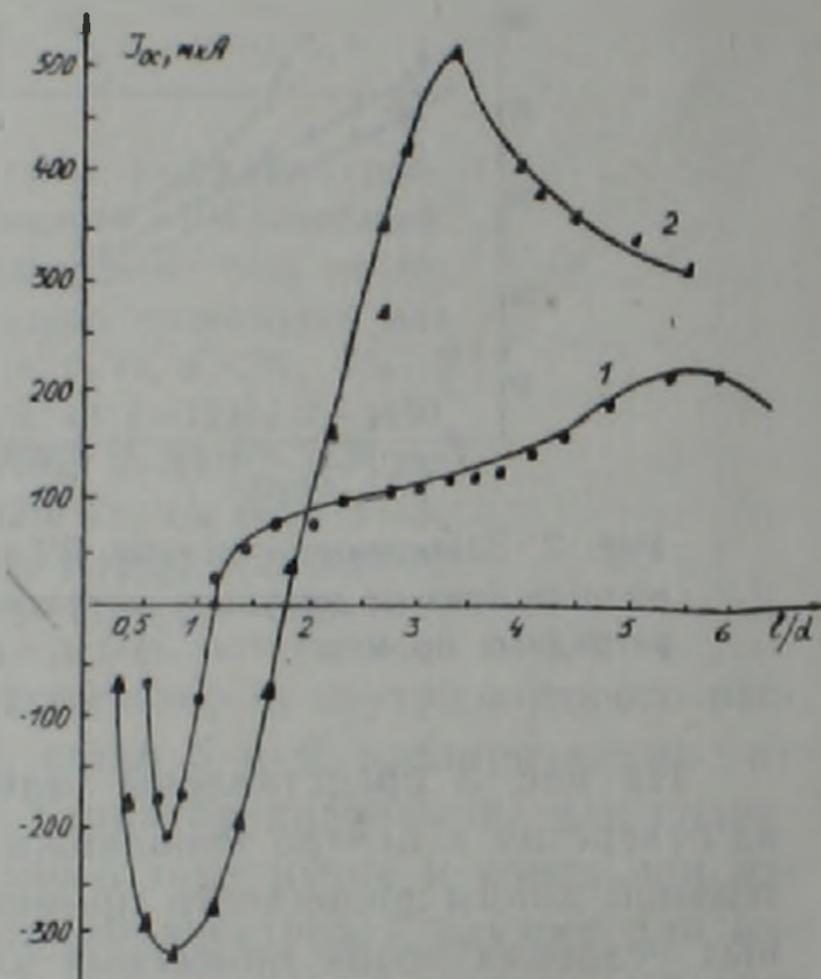


Рис. 4. Зависимость осевого компонента разрядного тока от относительной длины разрядного промежутка при $p = 4 \cdot 10^{-4}$ торр: 1— $U_a = 2,4$ кВ, $B = 1500$ Гс для d_1 , 2— $U_a = 3$ кВ, $B = 1300$ Гс для d_2

На рис. 4 показаны экспериментальные зависимости осевого компонента тока из отверстия в центре катода от $l_{\text{отн}}$ исследуемых ячеек. Видно, что в зависимости от длины разрядного промежутка при данных физических параметрах разрядные ячейки различных диаметров работают в различных режимах: ячейка меньшего диаметра становится преимущественно источником ионов, начиная с $l_{\text{отн}}$, равных 1,2 отн. ед., а большего диаметра — начиная с 1,7 отн. ед. Из отверстия в центре катода извлекается электронный ток, максимальное значение которого для разных ячеек (от 240 до 340 мкА) достигается при $l_{\text{отн}}$ равной 0,9. В этих условиях создается оптимальный режим работы газоразрядной ячейки в качестве источника электронов. Дальнейшее увеличение $l_{\text{отн}}$ приводит к спаду электронного тока. При этом мак-

симум электронного тока $J_{e\max}$ с ростом индукции магнитного поля смещается в сторону коротких разрядных промежутков, уменьшаясь по величине. С ростом же анодного напряжения его значение увеличивается. Максимальное значение ионной составляющей тока из отверстия приходится на различные значения $I_{0.11}$. Рост анодного напряжения при данных условиях приводит к росту максимального значения ионного тока $J_{i\max}$ из отверстия в центре катода.

Ход экспериментальных зависимостей свидетельствует о том, что с ростом $I_{0.11}$ радикально меняются структура и распределение пространственного заряда, а следовательно, и род потока заряженных частиц (рис. 4). Появление ВЧ-колебаний с изменением $I_{0.11}$ говорит о переходе от стационарного к динамическому режиму горения разряда, когда достигается критическое значение плотности электронов в прианодном слое $n_{кр}$, которое зависит от $B_{кр}$ согласно ⁽¹⁰⁾:

$$n_{кр} = \frac{B_{кр}}{4mc^2},$$

где $B_{кр}$ — значение индукции магнитного поля, при которой возникает неустойчивость; m — масса электрона; c — скорость света.

В нашем эксперименте $n_{кр}$ в среднем равнялось $(3-8) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, а по данным ⁽¹⁰⁾ $n_{кр} = 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

Из приведенных зависимостей следует, что для возникновения неустойчивостей кроме физических параметров важную роль играет и относительная длина разрядного промежутка. Ход экспериментальных зависимостей $\gamma = f(I_{0.11})$ показывает, что для широкого интервала физических параметров неустойчивое состояние возможно лишь для коротких разрядных промежутков. При больших относительных длинах разрядного промежутка в условиях эксперимента не было найдено какого-либо сочетания физических параметров, которое бы привело к неустойчивому режиму горения разряда. Это хорошо объясняется теорией диокотронных колебаний. Из сказанного следует, что для генерирования ВЧ-колебаний, создающих возможность получения потоков электронов из газоразрядного промежутка, в нем необходимо создать электрическое поле, средняя радиальная составляющая которого E_r , играющая основную роль в ионизационных процессах, сможет обеспечить интенсивную ионизацию разрядного промежутка. Это, в свою очередь, приведет к достижению критической плотности пространственного заряда в азимутально вращающемся прианодном слое, а следовательно, и к возникновению неустойчивости. Именно изменение относительной длины разрядного промежутка в горящем разряде и создает такое перераспределение компонентов E_r и E_z электрического поля ⁽¹¹⁾, при котором возможно выполнение вышеуказанных условий и объяснение всех наблюдаемых закономерностей.

Таким образом, изменение относительной длины разрядного промежутка приводит к коренной перестройке режимов горения разряда, определяемых перераспределением электрических полей по радиусу и по оси ячейки Пеннинга. Установлена область относительных длин $(0,5 \div 6)$ разрядных промежутков, в которой развиваются неустойчивости. Выявилось, что контроль за ВЧ-колебаниями разрядного проме-

жутка может служить дополнительным удобным средством диагностики разряда без какого-либо искажения пространственного заряда. Найдено оптимальное значение относительной длины разрядного промежутка, при которой ячейки различных радиусов могут служить источником электронов. Подтверждается непосредственная связь между интенсивностью ВЧ-колебаний и выходом аномальных электронов. Максимальная величина электронных токов достигает 340 мкА.

Ереванский
государственный университет
Ереванский
педагогический институт

Ո. Պ. ԲԱԲԵՐՑՅԱՆ, Է. Ս. ԲԱԴԱԼՅԱՆ, Գ. Ա. ԵԳԻԱԶԱՐՅԱՆ, Է. Ի. ՏԵՐ-ԴԵՎՈՐՅԱՆ

Փոփոխվող երկառույթամբ պեննինգի պարպման մեջ բարձր հանախային տատանումների զրգուման և նրանց կողմից անոմալ էլեկտրոնների էներգիայի վրա ունեցած ազդեցության մասին

Փորձնականորեն ցույց է տրված, որ պարպումային միջակայքի երկառույթյան անընդհատ փոփոխումով կարելի է զրգոել բարձր հաճախային տատանումներ, որոնք ուղեկցվում են կատոդի կենտրոնից դուրս եկող անոմալ մեծ էներգիայով օժտված էլեկտրոններով:

Դա թույլ է տալիս սառը կատոդներով բջիջը օգտագործել որպես էլեկտրոնների աղբյուր:

ЛИТЕРАТУРА—ԿՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

- ¹ H. R. Kaufman, R. S. Robinson, AIAA Journal, v. 20 p. 745—760 (1982).
- ² А. А. Куландин, С. В. Тимашев, Ю. С. Попов, Энергетические системы космических аппаратов. 2-е изд., Машиностроение, М., 1979.
- ³ P. П. Баберцян, Э. С. Бадалян, Э. И. Тер-Геворкян, ЖТФ, т. 53, № 4, с. 665—669 (1983).
- ⁴ P. П. Баберцян, Э. С. Бадалян, Э. И. Тер-Геворкян, ЖТФ, т. 49, № 7, с. 1445—1447 (1979).
- ⁵ P. П. Баберцян, Э. С. Бадалян, Э. И. Тер-Геворкян, ЖТФ, т. 50, № 7, с. 1565—1567 (1980).
- ⁶ P. П. Баберцян, Э. С. Бадалян, Э. И. Тер-Геворкян, Уч. зап. ЕГУ, № 1, с. 60—64, 1983.
- ⁷ P. П. Баберцян, Э. С. Бадалян, Г. А. Егiazарян, Э. И. Геворкян, Физика, Межвуз. сб. науч. тр., в. 5, с. 34—41 (1985).
- ⁸ P. П. Баберцян, Э. С. Бадалян, Г. А. Егiazарян, Э. И. Тер-Геворкян, Уч. зап. ЕГУ, № 1, с. 87—90, 1984.
- ⁹ P. П. Баберцян, Э. С. Бадалян, Г. А. Егiazарян, Э. И. Тер-Геворкян, ЖТФ, т. 55, № 1, с. 73—78 (1985).
- ¹⁰ W. Knauper, Journ. Appl. Phys. v. 37, № 2, 602—611 (1966).
- ¹¹ P. П. Баберцян, Э. С. Бадалян, Г. А. Егiazарян, Э. И. Тер-Геворкян, ЖТФ, т. 57, № 10, с. 2039—2049 (1987).