

Значение q_0 радиоактивных препаратов

Образец и его геометрия	Изотоп и его свойства	Давление, мм рт. ст.	Величина заряда q_0 , $\kappa/\text{см}^2$	
			рассчитанная	измеренная
Никель пластинка $1,8 \times 0,55 \times 0,07$ см	Ni^{63} 2 мкюри/г β -излучатель $E_{\text{макс}} = 0,067$ Мэв	760	$+0,8 \cdot 10^{-15}$	$+1 \cdot 10^{-15}$
		100	$+2,2 \cdot 10^{-15}$	$+2 \cdot 10^{-15}$
		10	$7,0 \cdot 10^{-15}$	$+5 \cdot 10^{-15}$
		1	$+2,0 \cdot 10^{-14}$	$+4 \cdot 10^{-14}$
Вольфрам диск $r = 1,5$ см $h = 0,2$ см	W^{185} 30 мкюри/г β -излучатель $E_{\text{макс}} = 0,427$ Мэв	760	$+1,4 \cdot 10^{-14}$	$+0,7 \cdot 10^{-14}$
		100	$+3,9 \cdot 10^{-14}$	$+3,0 \cdot 10^{-14}$
		10	$+1,2 \cdot 10^{-13}$	$+5,2 \cdot 10^{-14}$
		1	$+3,9 \cdot 10^{-13}$	$+5,5 \cdot 10^{-13}$
Цинк диск $r = 0,5$ см $h = 0,2$ см	Zn^{65} 13 мкюри/г α , β^+ -излучатель $E_{\text{макс}} = 0,32$ Мэв	760	$-1,6 \cdot 10^{-15}$	$-1 \cdot 10^{-15}$
		100	$-1,4 \cdot 10^{-14}$	$-1,2 \cdot 10^{-14}$
		10	$4,6 \cdot 10^{-14}$	$-2,6 \cdot 10^{-14}$

ваться видоизмененной формулой (3): q_+ (или q_-) $\approx ke\epsilon_I PQ\Psi/16\pi^2 r^2 \sigma_I$, где $\sigma_I = \sigma_0 + \sigma_i$, σ_0 — электропроводность сульфата стронция (10^{-14} ом $^{-1}$ см $^{-1}$); σ_i — дополнительная электропроводность SrSO_4 вследствие самооблучения (оценивается по данным работы [6]). Проведенные расчеты показывают, что локализованный в слое R заряд равен $2 \cdot 10^{-8}$ $\kappa/\text{см}^3$, что соответствует полю $\sim 10^4$ в/см. Следовательно, для образцов с $\sigma \approx 10^{-14}$ (ом см) $^{-1}$ и $Q \approx 10^2$ мкюри/г в слое R достигается пробойное напряжение $\sim 10^6$ в/см (если влиянием самонагревания I на σ_I можно пренебречь), и у поверхности в результате самопроизвольных разрядов могут появиться микротрещины. Такое саморастрескивание, по-видимому, должно наблюдаться у высокоактивных непроводящих образцов, например в стеклянных блоках с радиоактивными отходами.

Результаты вычисления заряда в слое R носят оценочный характер (так как неизвестна точная зависимость σ_I и ϵ_I от самооблучения), но они показывают, что в радиоактивных диэлектриках у поверхности имеется слой с неоднородным распределением зарядов.

Поступила в Редакцию 22/I 1968 г.
В окончательной редакции 22/V 1968 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Garrett. J. Chem. Educ., 33, 446 (1956).
2. В. И. Спицын, В. В. Громов. «Докл. АН СССР», 156, 427 (1964).
3. I. Stratton. Electromagnetic Theory. N.Y., McGraw-Hill Book Co., 1941, p. 15.
4. В. Г. Бару, Ф. Ф. Волькенштейн. «Изв. АН СССР. Отд. хим. н.», № 11, 1936 (1964).
5. Ю. И. Грибанов. Измерение малых токов и зарядов. М.—Л., Госэнергоиздат, 1962.
6. Б. М. Вул. «Физика твердого тела», 3, 2264 (1961).

Работа поверхностно-барьерных кремниевых счетчиков при облучении их протонами с энергиями 10—70 кэв

Г. Ф. БОГДАНОВ, Б. П. МАКСИМЕНКО

УДК 539.1.074

Широкое использование поверхностно-барьерных кремниевых счетчиков для регистрации и энергетического анализа нейтральных и заряженных частиц, выходящих из высокотемпературной плазмы в ловушках с магнитными пробками и характеризующихся большой плотностью потока, определило интерес к работоспособно-

сти счетчиков этого типа в условиях длительного облучения. Было замечено [1], что фоновый поток тяжелых низкоэнергетических ионов, попадающих на счетчик, находящийся в вакууме при давлении $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ торр, быстро увеличивал его обратный ток. В нормальных условиях обратный ток снижался до первоначаль-

ного значения. При облучении счетчика протонами с энергиями 6—36 кэв наблюдали [2] непрерывный рост обратного тока с увеличением интегрального потока протонов и уменьшение коэффициента усиления счетчика, работающего без внешнего смещения, при величине интегрального потока $\sim 2 \cdot 10^{11}$ частиц/см². Характеристики счетчика восстанавливались сравнительно быстро в среде воздуха, кислорода, азота и очень медленно — в вакууме.

В данной работе изучалось влияние облучения счетчика протонами с энергиями 10—70 кэв на коэффициент усиления (в токовом режиме) и амплитуду импульса (в счетном режиме), емкость, обратную ветвь вольт-амперной характеристики и полную ширину пика на половине максимума (ПШПМ) поверхностно-барьерных кремниевых счетчиков.

Аппаратура и методика измерений. Поверхностно-барьерные кремниевые счетчики были изготовлены по обычной технологии из кремниевых кристаллов размером $4 \times 4 \times 1$ и $6 \times 6 \times 1$ мм из материала *n*-типа с удельным сопротивлением ~ 150 — 200 ом·см и временем жизни неосновных носителей ~ 200 мксек. Толщина золотого слоя на рабочей поверхности была ~ 40 мкг/см². Величина обратного тока $I_{обр}$ при температуре $t^\circ = 18^\circ \text{C}$ и смещении $U_c = 50$ в составляла $(4-8) \cdot 10^{-8}$ а и $(1,6-2,4) \cdot 10^{-7}$ а для счетчиков с рабочей поверхностью ~ 3 и ~ 12 мм² соответственно.

Облучение счетчиков проводили на магнитном сепараторе, который обеспечивал на выходе пучок протонов интенсивностью 10^2 — 10^9 ипн/сек в диапазоне энергий 1—100 кэв при разбросе энергий не более 2,5%. Внутренний объем сепаратора откачивали диффузионными масляными насосами. В процессе измерений давление поддерживалось в пределах $2 \cdot 10^{-5}$ — $5 \cdot 10^{-6}$ торр.

В счетном режиме перед облучением измеряли обратную ветвь вольт-амперной характеристики счетчика, амплитуду импульса и ПШПМ при энергии протонов 70 кэв и интенсивности пучка 10^3 ипн/сек. Затем счетчик облучали и вновь определяли эти же характеристики. Перед началом облучения и после всей серии облучений измеряли емкость счетчика.

Измерение амплитуды импульса счетчика и ПШПМ проводили по обычной методике с помощью зарядово-чувствительного усилителя и амплитудного анализатора АИ-100. Сопротивление нагрузки счетчика было уменьшено до 10 Мом, так как величина его обратного тока при рабочем смещении в процессе облучения

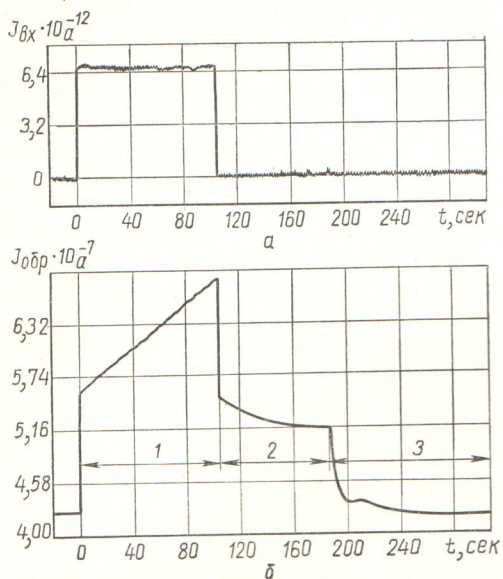
увеличивалась, что могло бы привести к уменьшению напряжения на переходе.

В токовом режиме до и после облучения измеряли обратную ветвь вольт-амперной характеристики и коэффициент усиления счетчика. Схема соединения счетчика с аппаратурой для измерения коэффициента усиления подобна той, которая описана в работе [3]. Импульс протонного тока длительностью от 1 сек до 20 мин через коллиматор и измерительную сетку попадал на рабочую поверхность счетчика. Входной ток измеряли по току предварительно откалиброванной сетки. Для записи электронной эмиссии с сетки и поверхности счетчика на экран подавали отрицательный потенциал. Регистрацию измеряемых токов производили с помощью самописцев. Максимальная чувствительность усилительного тракта для измерения входного тока составляла $4 \cdot 10^{-14}$ а/мм, для измерения выходного тока — $1,4 \cdot 10^{-11}$ а/мм.

Результаты измерений и обсуждение. Измерения амплитуды импульса счетчика ($t^\circ = 18^\circ \text{C}$; -120°C) в зависимости от смещения для протонов с энергией 70 кэв в счетном режиме и коэффициента усиления счетчика ($t^\circ = 18^\circ \text{C}$) для протонов с энергиями 20—70 кэв в токовом режиме показали, что смещением $U_c = 5$ в обеспечивается практически полный сбор неравновесных носителей, образующихся при регистрации протонов с энергиями 70 кэв и ниже.

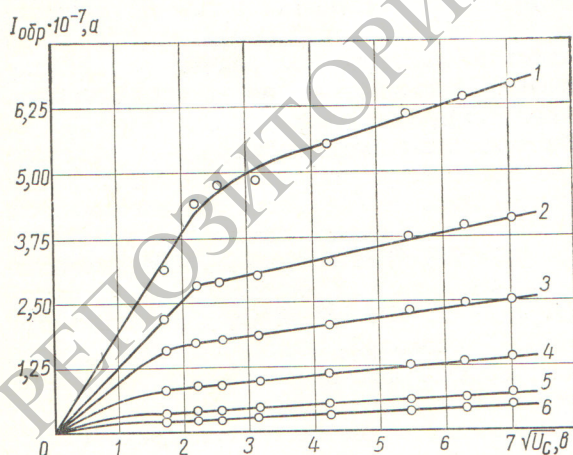
Измерения обратного тока счетчика и ПШПМ для системы счетчик — предусилитель ($t^\circ = 18^\circ \text{C}$) показали, что при изменении U_c от 15 до 50 в $I_{обр}$ увеличивался в $\sim 2,1$ раза, а величина ПШПМ возрастала всего на $\sim 6\%$. Увеличение ПШПМ, обусловленное ростом $I_{обр}$ при повышении U_c , могло маскироваться уменьшением ПШПМ из-за снижения емкости счетчика, поэтому счетчик был охлажден до $t^\circ = -120^\circ \text{C}$, при которой величина емкости счетчика и характер ее зависимости от смещения практически не изменились, а $I_{обр}$ стал намного меньше сеточного тока входной лампы предусилителя ($I_{обр} \ll 5 \cdot 10^{-10}$ а). Величина ПШПМ уменьшилась в $\sim 1,5$ раза и оставалась постоянной в интервале $U_c = 5$ — 50 в. Следовательно, при $t^\circ = 18^\circ \text{C}$ основной вклад в шуму дается начальным участком обратной ветви вольт-амперной характеристики счетчика.

На рис. 1 представлены осциллограммы входного и обратного токов счетчика ($t^\circ = 18^\circ \text{C}$, $U_c = 5$ в) в токовом режиме при энергии протонов 70 кэв, из которых видно, что переднему и заднему фронтам импульса входного тока протонов соответствуют аналогичные скачки



Р и с. 1. Осциллограммы входного (а) и обратного (б) токов счетчика.

обратного тока счетчика (границы области 1). Величина $I_{обр}$ за время импульса возросла в $\sim 1,3$ раза. После окончания импульса она постепенно уменьшается (область 2). Резкое падение $I_{обр}$ (область 3) вызвано поступлением воздуха в измерительную камеру. Причем иногда сразу же за уменьшением $I_{обр}$ в диапазоне давлений 80—40 торр начинается его рост (небольшой подъем в области 3) с последующим



Р и с. 2. Зависимость $I_{обр} = f(\sqrt{U_c})$ для разных величин интегрального потока протонов с энергией 30 кэв ($\text{частиц}/\text{см}^2$):

1 — $9,2 \cdot 10^{12}$; 2 — $6,8 \cdot 10^{12}$; 3 — $4,7 \cdot 10^{12}$; 4 — $2,1 \cdot 10^{12}$; 5 — $0,2 \cdot 10^{12}$; 6 — до облучения.

спадом при давлении ~ 20 торр и дальнейшим постепенным уменьшением. Коэффициент усиления счетчика при этом смещении за время импульса не изменялся и энергия образования пары электрон — дырка, определенная из величин переднего и заднего фронтов импульсов входного тока протонов и обратного тока счетчика, была равна $\sim 3,6$ эв.

На рис. 2 приведена зависимость $I_{обр} = f(\sqrt{U_c})$ для разных величин интегрального потока протонов с энергией 30 кэв при $t^\circ = 18^\circ \text{C}$. Максимальная величина интегрального потока составляла $\sim 9,2 \cdot 10^{12}$ $\text{частиц}/\text{см}^2$ при средней плотности потока $\sim 1 \cdot 10^9$ $\text{частиц}/\text{см}^2 \cdot \text{сек}$. На всех кривых имеются участки, где ток пропорционален $\sqrt{U_c}$. Для кривых, соответствующих величинам интегрального потока до $4,7 \cdot 10^{12}$ $\text{частиц}/\text{см}^2$, эти участки начинаются с $U_c = 3$ в. При дальнейшем увеличении интегрального потока линейный участок начинается при более высоких смещениях (например, с 18 в при потоке $9,2 \cdot 10^{12}$ $\text{частиц}/\text{см}^2$). В то же время наклон этих участков увеличивается с ростом интегрального потока и при величине потока $9,2 \cdot 10^{12}$ $\text{частиц}/\text{см}^2$ он в восемь раз больше, чем у счетчика до облучения.

Изучение зависимости роста обратного тока счетчика от энергии протонов показало, что нарастание $I_{обр}$ при одних и тех же величинах плотностей и интегральных потоков протонов с энергией 20 кэв на 20—50% больше, чем для протонов с энергией 70 кэв.

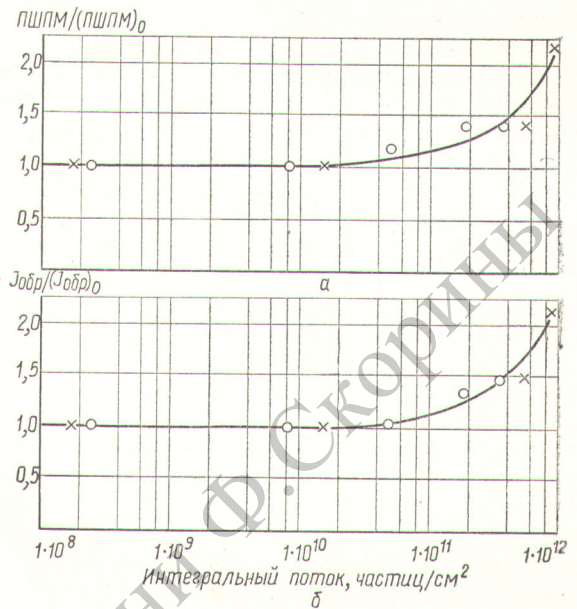
На рис. 3 представлены зависимости ПППМ и обратного тока счетчика ($t^\circ = 18^\circ \text{C}$, $U_c = 50$ в) от интегрального потока протонов с энергией 70 кэв. Облучение счетчика проводилось двумя циклами с перерывом 12 ч, в течение второго счетчик в среде воздуха полностью восстанавливал первоначальные значения вольт-амперной характеристики и разрешение. Средняя величина плотности потока протонов составляла $\sim 7,7 \cdot 10^8$ $\text{частиц}/\text{см}^2 \cdot \text{сек}$. Заметное увеличение ПППМ наступало при интегральном потоке $\sim 4 \cdot 10^{11}$ $\text{частиц}/\text{см}^2$, причем наблюдалась почти линейная зависимость между ростом обратного тока счетчика и увеличением ПППМ. При этом величина амплитуды импульса счетчика и его емкость не изменялись. Наклон линейного участка кривой $I_{обр} = f(\sqrt{U_c})$ для этого счетчика в процессе облучения увеличился в $\sim 1,7$ раза.

На рис. 4 приведены зависимости относительных величин обратного тока счетчика при $U_c = 10$ в и коэффициента усиления счетчика при

U_c , равном 0; 0,5; 2 в, от величины интегрального потока протонов с энергией 30 кэв, измеренные в токовом режиме ($t^\circ = 18^\circ \text{C}$) при средней плотности потока $\sim 1 \cdot 10^9 \text{ частиц/см}^2 \cdot \text{сек}$. Коэффициент усиления счетчика при $U_c = 2 \text{ в}$ не изменялся, в то время как при U_c , равном 0 и 0,5 в, он существенно уменьшался с ростом величины интегрального потока, причем спад имел экспоненциальный характер. Уменьшение коэффициента усиления счетчика при $U_c = 0$ начиналось, когда величина интегрального потока достигала $\sim 2 \cdot 10^{11} \text{ частиц/см}^2$, при $U_c = -0,5 \text{ в}$, — когда величина составляла $\sim 4 \cdot 10^{11} \text{ частиц/см}^2$. При величине интегрального потока $\sim 9 \cdot 10^{12} \text{ частиц/см}^2$ коэффициент усиления счетчика при смещениях 2 и 0,5 в отличался в ~ 10 раз, хотя среднее электрическое поле в рабочей области счетчика изменялось всего в два раза. Это свидетельствовало о значительном изменении условий сбора носителей. При этих же величинах интегрального потока наблюдался более быстрый рост $I_{обр}$.

Существует несколько объяснений эффектов, наблюдаемых при облучении поверхностно-барьерных кремниевых счетчиков протонами с энергиями 10—70 кэв.

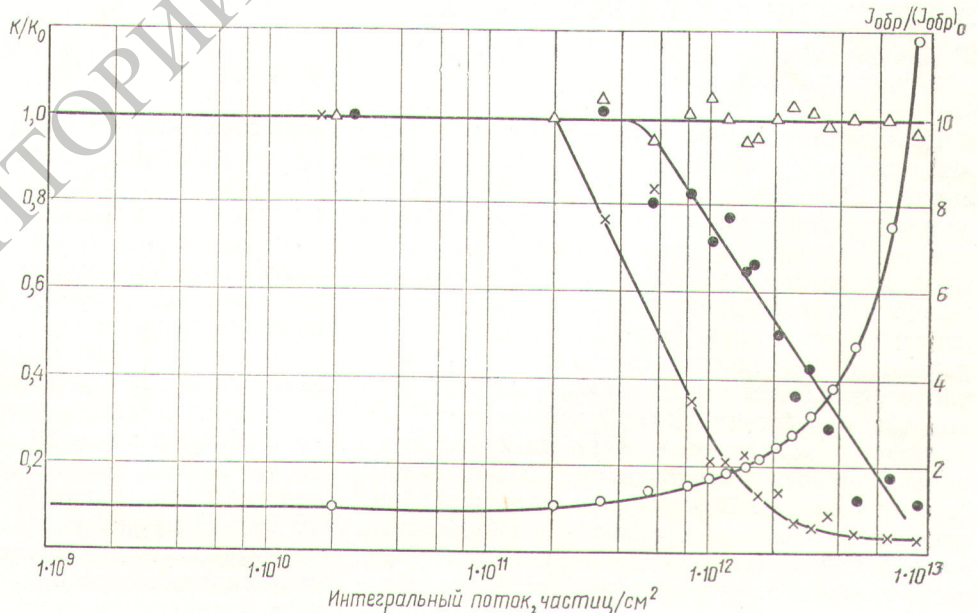
Так как для образования простейших дефектов — дефектов Френкеля — нижний энергетический порог у протонов составляет сотни электронвольт, одной из возможных причин увеличения и уменьшения коэффициента усиления счетчика при U_c , равном 0 и 0,5 в, вследствие



Р и с. 3. Зависимости ПШПМ $(I_{обр})_0$ (а) и $I_{обр}$ $(I_{обр})_0$ (б) от величины интегрального потока протонов с энергией 70 кэв:

$(I_{обр})_0$, $(I_{обр})_0$ — величины ПШПМ и обратного тока счетчика при смещении 50 в перед облучением; ПШПМ, $I_{обр}$ — те же величины во время облучения; \circ — первый цикл облучения; \times — второй цикл облучения.

облучения могут быть радиационные повреждения [4, 5]. Поскольку пробеги протонов с этими



Р и с. 4. Зависимость $(I_{обр})_0 / (I_{обр})_0$ при $U_c = 10 \text{ в}$ и K/K_0 при U_c , равном 0 (\times); 0,5 (\bullet); 2 в (Δ), от величины интегрального потока протонов с энергией 30 кэв:

$(I_{обр})_0$, K_0 — обратный ток и коэффициент усиления счетчика перед облучением; $I_{обр}$, K — обратный ток и коэффициент усиления счетчика во время облучения.

энергиями и, следовательно, все образовавшиеся дефекты находятся внутри естественного (без внешнего смещения) чувствительного слоя, этот эффект должен приводить к увеличению тока на начальном участке обратной ветви вольт-амперной характеристики счетчика, что и наблюдалось на опыте (см. рис. 2). С этим же эффектом, по-видимому, связаны участки относительно медленного уменьшения $I_{обр}$ при $t^\circ = 18^\circ \text{C}$ как в вакууме, так и в среде обычного воздуха (см. рис. 1, б, области 2 и 3).

Десорбция кислорода из оксидной пленки на поверхности кристалла под действием протонной бомбардировки может привести к увеличению тока на начальном участке обратной ветви вольт-амперной характеристики счетчика и к росту поверхностных токов утечки [увеличение наклона прямых участков на кривых $I_{обр} = f(V\bar{U}_c)$]. Вероятно, с этим же эффектом связано быстрое уменьшение $I_{обр}$ при помещении облученного счетчика в среду обычного воздуха (см. рис. 1) за счет быстрой диффузии кислорода через золото.

По-видимому, серьезное влияние на изменение исследуемых характеристик счетчиков при облучении их моноэнергетическими потоками протонов может оказать внедрение в чувствительный слой атомов водорода, локальная

концентрация которых на глубине, равной длине пробега протонов, может достигать значительных величин. Аномальное поведение коэффициента усиления облученного счетчика в зависимости от смещения (см. рис. 4) свидетельствует о наличии скачка потенциала вблизи поверхности.

В заключение авторы выражают благодарность Ю. С. Максиму и Н. Б. Строкану за обсуждение данной работы, Г. М. Новикову — за изготовление счетчиков, В. С. Павлюкевичу и В. В. Струлеву — за участие в измерениях и обработке экспериментальных результатов.

Поступила в Редакцию 17/1 1968 г.
В окончательной редакции 17/VI 1968 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Amsek, P. Baguch, O. Smulkowski. IRE Trans., NS-8, 1, 21 (1961).
2. Г. Ф. Богданов, М. М. Дремин, Б. П. Максименко. Диагностика плазмы. Т. 2. М., Атомиздат, 1968.
3. Н. Н. Бревнов, Ю. С. Максимов, В. С. Цыпленков. «Атомная энергия», 20, 149 (1966).
4. Д. Дирли, Д. Нортроп. Полупроводниковые счетчики излучений. М., «Мир», 1966.
5. В. С. Вавилов. Действие излучений на полупроводники. М., Физматгиз, 1963.

Возбуждение интенсивных ВЧ-колебаний в плазменно-пучковом разряде

И. А. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ, А. К. БЕРЕЗИН, В. А. БУЦ,
В. И. КУРИЛКО, Я. В. ФАЙНБЕРГ

УДК 533.9

Цель настоящей работы — выяснение условий, при которых возможно возбуждение интенсивных ВЧ-колебаний в плазменно-пучковом разряде. Так как основными параметрами, определяющими частотный спектр, инкременты нарастания колебаний и интенсивность возбуждаемых колебаний при заданных характеристиках (энергия и ток) электронного пучка, являются напряженность магнитного поля, плотность плазмы и радиальные размеры области взаимодействия, поэтому в работе были измерены зависимости частотных спектров и интенсивности возбуждаемых ВЧ-колебаний от этих величин. В результате этих измерений показано, что интенсивность возбуждаемых колебаний сильно зависит от напряженности магнитного поля и поперечных размеров области взаимодействия. Для заданных характери-

стик электронного пучка найдены такие условия (напряженность магнитного поля, давление рабочего газа, радиус области взаимодействия), при которых ВЧ-мощность колебаний, возбуждаемых в системе пучок — плазма, максимальна и достигает 120—150 *квт* в импульсе. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с теорией.

Блок-схема установки аналогична описанной ранее [1]. В экспериментах использовались импульсные электронные пучки с энергией 25 *кэв* и током 28 *а* (длительность импульса 4,5 *мксек*, частота посылок 50 *гц*, диаметр катода 2 *см*, длина области взаимодействия 40 *см*). Напряженность однородной части магнитного поля составляла 1000—2000 *э*. Плазма создавалась самим пучком. Давление рабочего газа (водород, воздух, аргон) в плазменной