

лизированной атомом гелия. Такие центры и ответственны, на наш взгляд, за полосу поглощения при  $\lambda = 535$  нм. Их отжиг идет в рамках известного ассоциативного процесса [2]: объединения вакансий и смещения гелия из исходной позиции с образованием возмущенного  $M$ -центра.

Таким образом, при насыщении монокристаллов  $CaF_2$  гелием возрастает эффективность радиационного окрашивания, после облучения при 77 К возникает новая полоса поглощения при  $\lambda = 535$  нм.

Полученные результаты позволяют предположить, что за увеличение эффективности ТСЛ и радиационного окрашивания кристаллов ответственен новый оптический центр ( $\lambda = 535$  нм), связанный с гелием.

Авторы благодарят Б.В. Шупльгина и В.Н. Саломатова за обсуждение результатов.

### Л и т е р а т у р а

- [1] Архангельская В.А., Феофилов П.П. - Квантовая электроника, 1980, т. 7, с. 1141-1154.
- [2] B e s s e n t R.G., H a y e s W. - Proc. R. Soc., 1969, v. A309, p. 69-82.
- [3] V o l l m a n n W. - Crystal Lattice Defects, 1977, v. 7, N 3, p. 138-148.
- [4] Купряжкин А.Я. В кн.: Спектроскопия твердого тела, Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984, с. 40-44.
- [5] П о п о в Е.В., Купряжкин А.Я. - ЖТФ, 1983, т. 53, № 3, с. 365-368.

Поступило в Редакцию  
15 декабря 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 9

12 мая 1988 г.

### О РАСШИРЕНИИ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ГЕНЕРАТОРЕ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.Ф. Александров, С.Ю. Галузо,  
А.А. Гришаев, В.А. Кубарев,  
В.В. Михеев, В.А. Плетюшкин,  
В.Ю. Сергиенко

Сильноточные электронные пучки, формируемые магнитоизолированными коаксиальными диодами с катодами со взрывной эмиссией, нашли широкое применение в различных генераторах мощных СВЧ импульсов (в том числе черенковского типа), причем в этом случае обычно необходимы тонкостенные трубчатые электронные пучки. С повышением длительности пучка ( $\tau \approx 1$  мкс) на его формировании

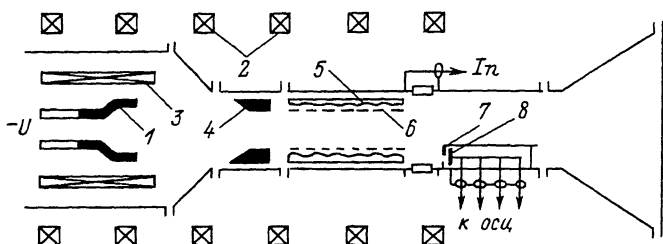


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

существенно сказывается разлет катодной плазмы, который приводит к изменению радиального распределения плотности тока в рабочем пространстве СВЧ генератора [1, 2]. К тому же эффекту может привести и взаимодействие электронов потока с сильным СВЧ полем в электродинамической системе генератора. Ниже приведены результаты исследования этих процессов.

Эксперименты проводились на сильноточном импульсном ускорителе „Тандем-1“ [3], с помощью которого формировался трубчатый электронный пучок с током 1.7 кА, длительностью импульса по попувысоте  $\tau = 1$  мкс при ускоряющем напряжении  $U = 300$  кВ. Катод ускорителя представлял собой тонкостенный графитовый цилиндр диаметром  $2R_k = 5.5$  см (рис. 1, 1). Область формирования пучка помещалась в слабонеоднородное квазистационарное магнитное поле  $B_0 = 7.1$  кГс, создаваемое секционированным соленоидом 2. Для компенсации радиального расширения пучка катодная область помещалась в дополнительное импульсное магнитное поле  $\Delta B$ , которое создавалось при разряде конденсатора на размещенный внутри вакуумной камеры импульсный соленоид 3 диаметром 12 см и ослабляло в этой области основное ведущее поле  $B_0$  [2]. Период импульсного магнитного поля  $T$  составлял 6 мкс, скорость его изменения составляла 1.2 кГс/мкс при амплитудном значении  $\Delta B_a = 1.4$  кГс. Импульсное магнитное поле с такими параметрами не экранируется катодной плазмой (толщина скин-слоя около 1 см) и проникает через стенки графитового катода.

Мощное СВЧ излучение создавалось релятивистским генератором поверхностной волны (РГПВ), аналогичным описанному в работе [4]. В наших экспериментах он генерировал СВЧ излучение трехсантиметрового диапазона длин волн мощностью 20–40 МВт при длительности импульса излучения по основанию до 0.3 мкс. При этом в рабочее пространство генератора (рис. 1, 5) пучок инжектировался через графитовую диафрагму 4, что позволило предотвратить попадание менее плотной периферийной области пучка на поверхность генератора. Расширение пучка исследовалось сначала в условиях, когда возбуждения генератора не происходило, а затем при наличии сильного СВЧ-поля. Для этого в первом случае диафрагмированная стенка генератора закрывалась тонкой металлической фольгой 6.

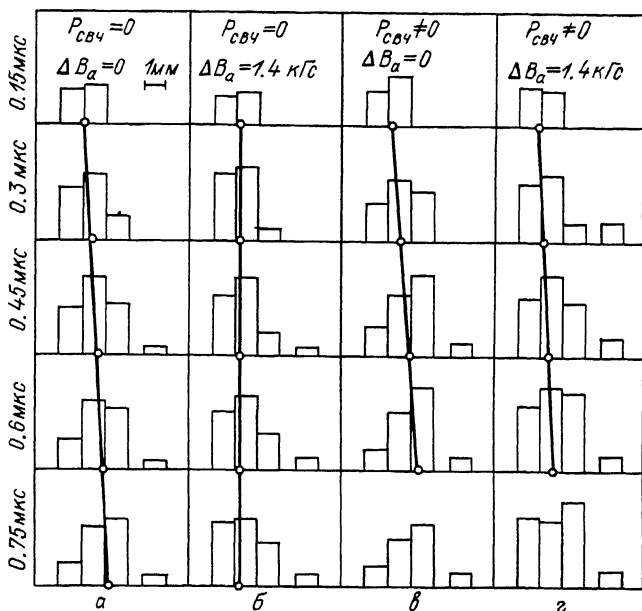


Рис. 2. Гистограммы радиального распределения плотности тока пучка.

Для регистрации радиального распределения плотности тока пучка использовался секторный секционированный коллектор. В графитовой диафрагме, выполненной в виде сектора (рис. 1, 7), частично перекрывающей сечение выходного сверхразмерного волновода, были сделаны коллимирующие отверстия диаметром 1.25 мм, расположенные на различных расстояниях от оси пучка с азимутальным смещением. За этими отверстиями располагалась система графитовых коллекторов, с помощью которых измерялись проходящие через отверстия токи (8). Результаты проведенных экспериментов представлены на рис. 2 в виде гистограмм радиального распределения плотности тока пучка в различные моменты времени.

В экспериментах с закрытой замедляющей структурой генератора (в отсутствие СВЧ излучения) было зарегистрировано постепенное увеличение радиуса области с максимальной плотностью тока (керна) пучка (рис. 2, а) со скоростью  $V_1 = 2-2,5 \text{ мм/мкс}$ , что совпадает с полученными ранее данными работы [2].

Для того, чтобы электроны попадали в одну и ту же область внутри генератора, следовало подобрать скорость нарастания дополнительного импульсного магнитного поля такой, чтобы силовые линии суммарного магнитного поля вблизи катода перемещались со скоростью передвижения эмиттирующей границы катодной плазмы. Эксперименты показали, что при включении импульсного магнитного поля с амплитудным значением  $\Delta B_a = 1.4 \text{ кГс}$  удается стабилизи-

ровать положение пучка (рис. 2, б). Скорость перемещения силовых линий суммарного магнитного поля, рассчитанная по формуле

$$V_{\perp p} = \frac{Rk}{2B_0} \cdot \frac{d}{dt} (\Delta B), \quad (1)$$

оказалась равной 2.4 мм/мкс, что согласуется с определенной экспериментальной скоростью расширения керна пучка.

При работающем СВЧ генераторе скорость расширения керна оказалась бóльшей и составляла 3–3.5 мм/мкс (рис. 2, в). Необходимо отметить, что расширение пучка с такой скоростью продолжалось и после окончания СВЧ импульса. Приложением импульсного поля с прежним амплитудным значением  $\Delta B_0 = 1.4$  кГс удавалось выделить эффект воздействия сильного СВЧ поля на электронный пучок в чистом виде (рис. 2, г), длительность импульса СВЧ излучения при этом практически не изменилась.

Для контроля точности использованного метода определения радиального распределения плотности тока РЭП проводилось сравнение значений тока пучка, полученных при интегрировании плотности тока по его поперечному сечению, исходя из гистограмм на рис. 2. Следует отметить, что с начала импульса до момента времени  $t \approx \approx 0.45$  мкс значения полученных таким образом токов РЭП во всех режимах работы практически совпадают, отличия не превышают  $\pm 10\%$ .

В настоящее время недостаточно теоретических и экспериментальных данных, позволяющих полностью объяснить описанное явление. Однако по этому поводу следует отметить, что наличие сильного СВЧ поля в пространстве взаимодействия генератора должно приводить к радиальному дрейфу частиц. Для оценки скорости такого дрейфа можно рассмотреть движение электронов в поле синхронной с пучком электромагнитной волны с учетом конечной величины ведущего магнитного поля. В предположении постоянства фазы волны относительно частиц задача сводится к анализу движения в эквивалентных статических полях. Скорость радиального дрейфа зависит от фазы влета частиц в генератор. Для оценки максимальной скорости дрейфа  $V_{dp}$  возьмем характерные значения амплитуд продольной компоненты электрического поля  $E_z = 100$  кВ/см и азимутальной компоненты магнитного поля волны  $B_\varphi = 300$  Гс. В соответствии с формулой (система СИ)

$$V_{dp} = \frac{E_z B_\varphi}{B_0^2} \quad (2)$$

при ведущем магнитном поле  $B_0 = 7$  кГс получим  $V_{dp} \approx 6 \cdot 10^5$  м/с. При этом радиальное смещение частиц за время пролета ими генератора длиной  $L \approx 30$  см может достигнуть нескольких миллиметров.

Из требования малости радиального смещения электронов по сравнению с расстоянием  $\Delta$  пучок–стенка замедляющей структуры следует условие замагниченности релятивистского пучка ( $c$  – скорость света)

$$V_0^2 \gg \frac{E_z V \varphi L}{c d},$$

(3)

которое зависит от величины СВЧ-полей и геометрии системы.

Рассмотренный механизм радиального дрейфа не может непосредственно влиять на транспортировку пучка после окончания импульса СВЧ излучения. Однако он может давать начальное возмущение параметров РЭП, которое приводит к развитию других самоподдерживающихся механизмов, необратимо изменяющих структуру пучка.

### Л и т е р а т у р а

- [1] Александров А.Ф., Галузо С.Ю., Михеев В.В., Плетюшкин В.А., Суходольский В.Н. - ЖТФ, 1982, т. 52, в. 1, с. 110-111.
- [2] Александров А.Ф., Воронков С.Н., Галузо С.Ю., Михеев В.В., Стрелков П.С., Шкварунец А.Г. В кн.: У Всесоюзный симпозиум по сильноточной электронике. Тезисы докладов. Новосибирск, 1984. Томск: ИСЭ СО АН СССР, 1984, ч. 2, с. 22-24.
- [3] Александров А.Ф., Галузо С.Ю., Канавец В.И., Плетюшкин В.А., Слепков А.И. - ЖТФ, 1980, т. 50, в. 11, с. 2381-2389.
- [4] Александров А.Ф., Галузо С.Ю., Канавец В.И., Плетюшкин В.А. - ЖТФ, 1981, т. 51, в. 8, с. 1727-1730.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступило в Редакцию  
10 июля 1987 г.

В окончательной редакции  
5 января 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 9

12 мая 1988 г.

### О НОВОМ ТИПЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ КАНАЛИРОВАНИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В КРИСТАЛЛЕ

Б.В. Х о л о м а й

В работе дается теоретическое обоснование нового типа излучения, обнаруженного экспериментально в ЦЕРН [1] при каналировании в кристалле германия пучков электронов с энергией  $E = 150$  ГэВ.

Новый тип излучения [1] характеризуется высоким энергетическим пиком в спектре излучения, приходящимся на излучаемые фотоны с энергией  $0.85 E$ . Авторы работы [1] предполагают, что