

## ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОЙ ПЛОТНОСТИ СГУСТКОВ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА, СФОРМИРОВАННОГО ПУШКОЙ С СВЧ-УПРАВЛЕНИЕМ

*И. В. Шеболаев, Ю. Д. Черноусов*

Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН,  
Новосибирск, Россия

Приведены результаты измерений фазовой плотности (ФП) сгустков электронного пучка, сформированного пушкой с СВЧ-управлением током инжекции. Инжектируемый пушкой пучок, состоящий из последовательности электронных сгустков, коллимируется и отклоняется магнитным СВЧ-полем резонатора-дефлектора. В плоскости регистрации формируется линейная или кольцевая развертка электронного пучка. Дефлектор возбуждается на частоте повторения сгустков или отличной от нее. В первом случае ФП электронов в сгустках характеризуется интенсивностью флуоресценции люминофора в плоскости регистрации. При возбуждении дефлектора на частоте, отличной от частоты следования сгустков, пикосекундные строб-импульсы тока выделяются щелевым коллиматором, а огибающая последовательности строб-импульсов, представляющая ФП электронов в сгустках, регистрируется с помощью цилиндра Фарадея и осциллографа. Обнаружено влияние амплитуды управляющего СВЧ-напряжения сетки пушки на ФП формируемых сгустков.

The results of measurements of the phase density (PD) of electron beam bunches formed by a gun with microwave control of the injection current are presented. The beam formed by the gun, consisting of a sequence of electron bunches, is collimated and deflected by the magnetic microwave field of the resonator-deflector. A linear or annular beam scan is formed in the registration plane. The deflector is excited at the bunch repetition frequency, or different from it. In the first case, the PD of electrons in bunches is characterized by the intensity of phosphor fluorescence in the recording plane. When the deflector is excited at a frequency different from the bunch repetition rate, picosecond current strobe pulses are extracted with a slit collimator, and the envelope of the strobe pulse sequence which represents the PD of electrons in bunches is recorded using a Faraday cup and an oscilloscope. The influence of the amplitude of the control microwave voltage of the gun grid on the PD of the formed bunches is found.

PACS: 29.20.-c

### ВВЕДЕНИЕ

СВЧ-метод управления током инжекции электронной пушки, описанный в [1], получил широкое распространение в ускорительной технике [1–5, 7–10]. Согласно этому методу с помощью СВЧ-сигнала током управляют и формируют пучок, состоящий из последовательности коротких импульсов тока — электронных сгустков. За один период действия управляющего СВЧ-сигнала формируется один импульс тока. Длительность импульсов лежит в субнаносекундном временном диапазоне, и измерение

их параметров — зависимости тока пушки от времени в течение периода управляющего СВЧ-сигнала (фазовой плотности — ФП) — представляет сложную задачу. При прямом измерении параметров токовых импульсов даже с помощью широкополосного осциллографа, расположенного в непосредственной близости от датчика тока (цилиндра Фарадея), форма сгустков не выявляется, а надежно регистрируется только период их следования [4, 5]. Причина в том, что при передаче субнаносекундных импульсов тока по коаксиальной линии, соединяющей датчик тока и осциллограф, за счет дисперсии происходит трансформация частотного спектра импульсов, сглаживание тонкой структуры и искажение формы [6]. Использование оптических методов путем преобразования импульса тока в импульс света и дальнейшее использование стрик-камеры для измерения ФП исключено из-за малой энергии инжекционного пучка.

В [7] применялась методика, в соответствии с которой электроны подвергались воздействию поперечного магнитного СВЧ-поля дефлектора, возбуждаемого на частоте, равной частоте следования сгустков. Дефлектор включал в себя два резонатора, создающих взаимно ортогональные отклоняющие моды, формирующие круговое сканирование пучка электронов. ФП электронных сгустков определяли по свечению флуоресцентного экрана, расположенного в плоскости регистрации [7].

В реальных условиях может изменяться как частота, так и напряжение в течение импульса инжекции (обычно 1–10 мкс). При этом ФП и длительность сгустков могут изменяться как в течение импульса инжекции, так и от импульса к импульсу. По этой причине происходит усреднение, присущее данному методу, что приводит к искажению ФП при измерениях и уширению фазовой протяженности сгустков.

В [8] предложена и реализована методика, позволяющая регистрировать ФП сгустков за относительно короткое время, в несколько раз меньшее длительности импульса ускорения, т. е. менее 10 мкс. Пучок отклонялся магнитным полем СВЧ-дефлектора, возбуждаемым на частоте  $f_D$ , отличной от частоты следования сгустков  $f_G$ . При этом фаза отклоняющего поля дефлектора  $\phi_D$  относительно фазы управления пушки  $\phi_G$  является линейной функцией времени:

$$\phi_D = \phi_0 + 2\pi(f_G - f_D)t, \quad (1)$$

а ФП сгустков регистрируется за время

$$\Delta t = \frac{1}{f_G - f_D}. \quad (2)$$

Например, при  $f_G - f_D = 10$  МГц время регистрации составляет  $\Delta t = 100$  нс. Выделенная коллиматором, расположенным на оси не отклоненного пучка, огибающая последовательности строб-импульсов в наносекундном масштабе времени представляла ФП сгустков на выходе ускорителя. Временное разрешение составляло около 1 пс, а измеренная фазовая длина сгустков на выходе ускорителя составляла около 8 пс [8]. Было показано, что фазовая протяженность электронных сгустков модулирована и зависит от времени в течение 3-мкс импульса СВЧ-питания ускорителя, что обусловлено амплитудно-частотной модуляцией использованного магнетронного генератора [9].

## МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ, СХЕМА, РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе, в продолжение работ [7, 8], измерялась фазовая плотность электронного пучка пушки с СВЧ-управлением током инъекции [1]. Упрощенная схема измерений (приведена для одной отклоняющей моды) представлена на рис. 1. Трех-электродная электронная пушка (e-Gun) с микроволновым сеточным управлением (Grid) формирует электронный пучок с регулируемой энергией 30–60 кэВ, состоящий из последовательности импульсов — электронных сгустков (e-Bunch) [1]. На выходе из пушки установлен коллиматор 1, вырезающий центральную часть пучка. Дополнительный коллиматор 2 расположен на входе в дефлектор. После прохождения дрейфового пространства пучок отклоняется магнитным полем дефлектора (силой Лоренца), в плоскости рисунка превращается в сектор и падает на плоскость регистрации (R-плоскость), вызывая свечение люминофора. Строб-импульсы тока (фрагменты сгустка) проходят через щель, расположенную на оси неотклоненного луча, и электроны попадают на коллектор — цилиндр Фарадея.

Мы использовали дефлектор, аналогичный [7], который создает две взаимно ортогональные отклоняющие моды. Опыты проводились при условии  $f_D = f_G$  и при условии  $f_D \neq f_G$ . Использовалась круговая развертка пучка. При включении двух мод пучок разворачивается в эллипс или окружность. При условии  $f_D = f_G$  на экране люминофора наблюдается кольцевая развертка пучка, по которой можно судить о ФП и фазовой протяженности сгустков (рис. 2).

Интенсивность свечения люминофорного экрана качественно характеризует ФП электронов в e-сгустке. С увеличением тока пучка увеличивается интенсивность свечения люминофора, и из рис. 2 видно, как меняется распределение электронов в сгустках (т. е. ФП и область фаз, занимаемая электронным сгустком).

При  $f_D \neq f_G$  с помощью цилиндра Фарадея в течение относительно длительного импульса тока пушки длительностью  $T = 1-10$  мкс регистрируется несколько импульсов, представляющих собой ФД электронного сгустка. ФД регистрируется за относительно короткое время, определяемое соотношением (2), и появляется возмож-

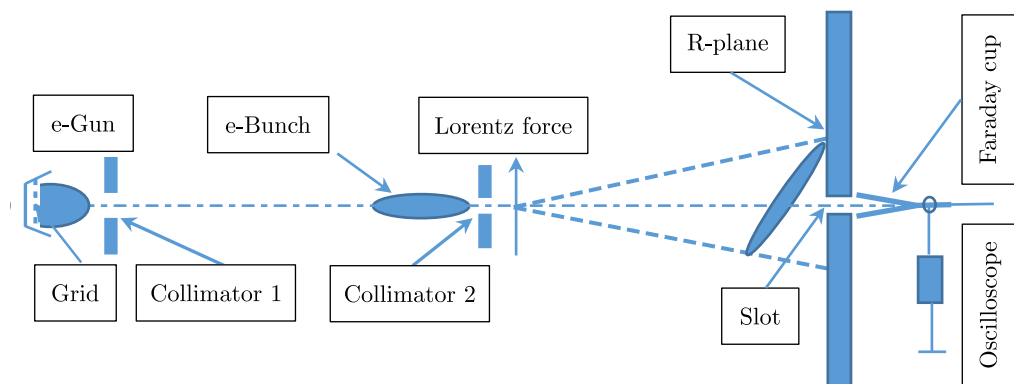


Рис. 1. Схема измерения. Расстояние от сетки пушки до анода пушки составляло 3 см, от пушки до дефлектора — 25 см. Щелевой зазор коллиматора составлял 1 мм. Рабочая частота пушки 2450 МГц

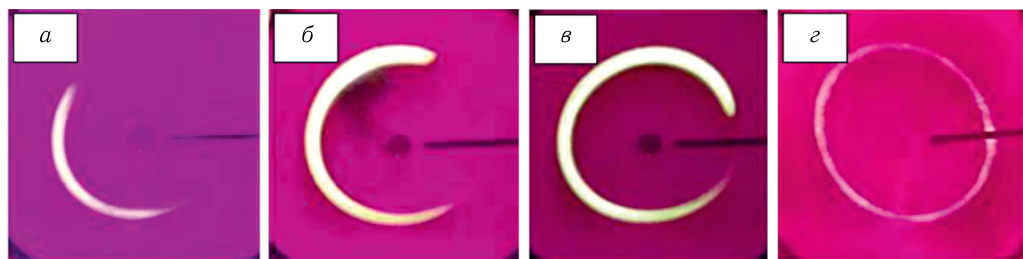


Рис. 2. Картины кольцевой развертки пучка: а) ток пушки 50 мА, фазовая длина (ФД) сгустков  $\Delta\varphi < 2\pi/3$ ; б) ток пушки 200 мА, ФД сгустков  $\Delta\varphi \approx \pi$ , электроны сосредоточены в начале сгустка; в) ток пушки 250 мА, ФД сгустков  $\Delta\varphi > \pi$ ; г) кольцевая развертка луча,  $f_D \neq f_G$ , ток пушки 50 мА

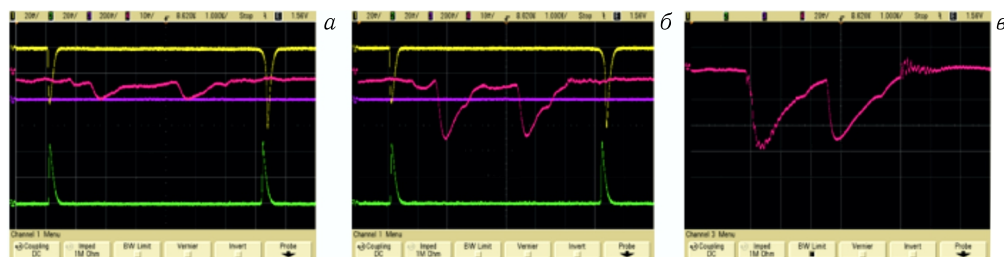


Рис. 3. Огибающая последовательности строб-импульсов, показывающая зависимость ФП сгустков от времени в течение периода управляющего СВЧ-поля. а) Ток пушки 50 мА, ФД сгустков  $\Delta\varphi < 2\pi/3$ ; б) ток пушки 200 мА, ФД сгустков  $\Delta\varphi \approx \pi$ ; в) ток пушки 300 мА, ФД сгустков  $\Delta\varphi > 2\pi$ . Разность частот  $f_D - f_G = 1$  МГц. Верхняя и нижняя линии с пиками характеризуют настройку отклоняющих резонаторов на рабочую частоту развертки  $f_D$ . Связь обоих резонаторов с питающими линиями близка к критической

ность проследить зависимость ФД сгустков от времени в течение импульса инжекции. Сущность метода заключается в следующем. При изменении фазы отклоняющего магнитного поля положение е-сгустка в R-плоскости меняется, и при  $f_D \neq f_G$  части (фрагменты) е-сгустка последовательно проходят через коллиматор. С помощью цилиндра Фарадея при  $f_D - f_G \approx 1-10$  МГц в субмикросекундном масштабе времени формируется огибающая последовательности строб-импульсов, представляющая собой ФД электронов в е-сгустке. Форма огибающей регистрируется на осциллографе. Результаты измерений представлены на рис. 3. Численные данные приведены в подпункте к рис. 3.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована электронная пушка с СВЧ-управлением током инжекции. Эксперименты показали, что такая пушка формирует модулированный пучок, состоящий из последовательности сгустков — импульсов тока малой длительности. При малых токах, менее 50 мА (рис. 2, а, 3, а), форма зависимости ФП сгустков от времени близка

к треугольной со сглаженной вершиной, длительность импульсов сгустков не превышает 130 пс, почти все электроны сосредоточены в области фаз  $\Delta\varphi < 2\pi/3$ .

Электроны, модулированные сеткой по энергии и, соответственно, по скорости, в дрейфовом пространстве перераспределяются и концентрируются в начале сгустка. В результате при больших токах форма временной зависимости ФП сгустков становится близкой к треугольной с коротким передним и длинным задним фронтами. При токах до 200 мА сгусток в целом занимает область фаз  $\Delta\varphi \approx \pi$ , соответственно, длительность импульсов (сгустков) составляет до 200 пс (рис. 2, б, 3, б).

Для уменьшения влияния эффекта группировки и сохранения малой длительности импульсов — сгустков в конкретных установках — длину дрейфового пространства следует по возможности уменьшать. Например, при установке электронной пушки с СВЧ-управлением током инжекции непосредственно на вход ускоряющей структуры с параллельной связью длина дрейфового пространства была минимизирована. Благодаря этому длина сгустков, входящих в ускоряющую структуру, также была минимизирована, и захват электронов в режиме ускорения составил 100% [10]. При больших токах захват электронов в режим ускорения уменьшался и при токах инжекции более 300 мА становился менее 90% [10]. Уменьшение захвата, по-видимому, связано с перераспределением электронов в сгустках и увеличением фазовой протяженности сгустков до величины  $\Delta\varphi > 2\pi$  (рис. 3, в) уже в зазоре между сеткой и анодом пушки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bogomolov A. S., Zakutov E. M.* Three-Electrode Electron Gun with Microwave Injection Current Control // PTE. 1973. No. 3. P. 23.
2. *Poole D. E. et al.* An RF Modulated Electron Gun for NINA Injection Equipment // Proc. of PAC. 1973. P. 399–400.
3. *Dykes D. M. et al.* The Electron Gun for the Daresbury SRS Linac // Proc. of Linac. 1996. P. 160–162.
4. *Park S. J. et al.* 2.856-GHz Modulation of Conventional Triode Electron Gun // Proc. of Linac. 2000. P. 137–139.
5. *Gold S. H. et al.* Development of a High Average Current RF Linac Thermionic Injector // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2013. V. 16. P. 083401.
6. *Naydenov A. I.* Transformation of the Spectrum of Nanosecond Pulses. М.: Sov. Radio, 1973. 180 p.
7. *Bogomolov A. S., Zakutov E. M., Shebolaev I. V.* Analyzer of the Distribution of Electrons in the Beam in Terms of Energies and Phases // PTE. 1973. No. 3. P. 27–30.
8. *Chernousov Yu. D., Shebolaev I. V.* Measurement of the Electron Phase Spectrum at the Output of a Travelling Wave Accelerator // J. Tech. Phys. 1982. V. 52, No. 6. P. 1114–1116.
9. *Bogomolov A. S. et al.* Installation for the Initiation of Fast Radiation-Chemical Processes // PTE. 1983. No. 2. P. 210–212.
10. *Chernousov Yu. D., Shebolaev I. V., Ikryanov I. M.* New Experimental Results on RF Accelerator with Parallel-Coupled Structure and RF-Controlled Gun // Proc. of the 25th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC2016), Saint Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016. P. 224–226.

Получено 15 сентября 2023 г.