

ГЕНЕРАЦИЯ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ 1–0.2 нс И АМПЛИТУДОЙ ТОКА БОЛЕЕ 400 А

© 2013 г. С. Б. Алексеев, Д. В. Рыбка, В. Ф. Тарасенко

*Институт сильноточной электроники СО РАН
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3*

E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 04.10.2012 г.

Исследованы условия формирования субнаносекундных пучков электронов с регулируемой длительностью импульса в режиме вакуумного диода при использовании генератора СЛЭП-150. Подтверждено, что при наносекундной длительности импульса напряжения наличие в диоде воздуха с остаточным давлением ≤ 0.1 Торр не влияет на амплитуду и длительность тока пучка. Показано, что увеличение давления воздуха от 0.1 до 6 Торр приводит к уменьшению длительности импульса тока пучка на полувысоте от ~ 1 до 0.18 нс и к его более ранней генерации по отношению к фронту импульса напряжения. Установлено, что амплитуда первого пика тока пучка за фольгой в этих условиях не изменяется и составляет ≥ 400 А. Показано, что при межэлектродных зазорах, оптимальных для вакуумных диодов, сокращение длительности импульса с ростом давления обусловлено пробоем промежутка за время ≤ 200 пс.

DOI: 10.7868/S0032816213040162

Ускорители электронных пучков прямого действия находят применение в различных областях науки и техники [1–4]. Для получения импульсов тока пучка с наибольшими амплитудами импульсы высокого напряжения от генераторов подаются на вакуумные диоды. Длительность импульса тока пучка в таких ускорителях определяется длительностью импульса высокого напряжения на промежутке. Для создания ускорителей с длительностью импульса в сотни пикосекунд необходимо формировать импульсы напряжения субнаносекундной длительности, что представляет довольно сложную техническую задачу [2, 5, 6].

Импульсы тока пучка с длительностью на полувысоте ≤ 100 пс могут быть получены с помощью газовых диодов [7–10]. В настоящее время на ускорителе с газовым диодом, заполненным воздухом атмосферного давления, наибольшая амплитуда сверхкороткого лавинного электронного пучка (с.л.э.п.) получена в работе [10] и составила ~ 100 А при длительности импульса тока на полувысоте ~ 100 пс. При уменьшении диаметра катода плотность тока пучка в центре фольги достигала 20 А/см².

В работах [11, 12] было показано, что при уменьшении давления гелия, водорода и азота в газовом диоде, при сохранении режима генерации с.л.э.п., амплитуда тока пучка может быть увеличена до нескольких сотен ампер. При этом плотность тока пучка в центре фольги возрастала до ~ 100 А/см², а длительность импульса на полувысоте составляла ~ 100 пс. Однако в этих работах

исследования при малых давлениях различных газов проводились только при межэлектродном промежутке, оптимальном для работы газового диода с трубчатым катодом $\varnothing 6$ мм. Из литературы известно, что оптимальные межэлектродные зазоры в вакуумных диодах по сравнению с зазорами в газовых диодах при тех же амплитудах импульса напряжения в несколько раз меньше (см., например, зависимость от величины межэлектродного зазора на рис. 2b в работе [8] и данные в работе [13]).

Цель настоящей работы – исследование влияния малых (единицы–доли единиц торр) давлений воздуха на амплитуду и длительность тока пучка при оптимальном для вакуумного диода межэлектродном промежутке. Исследования были проведены при длительности формируемого импульса напряжения на полувысоте ~ 1 нс и его фронте ~ 0.3 нс.

Для формирования импульсов использовался генератор СЛЭП-150 [9, 10], разработанный для получения пучков электронов в газовых диодах. Конструкции коаксиальной линии, заполненной трансформаторным маслом, и диода аналогичны используемым в работе [9].

Внутренний проводник высоковольтной коаксиальной линии с волновым сопротивлением 30 Ом был образован корпусом обострительного разрядника Р-43, удлиненным на 4 см отрезком цилиндра того же диаметра (4 см). Напряжение пробоя разрядника составляло ~ 150 кВ.

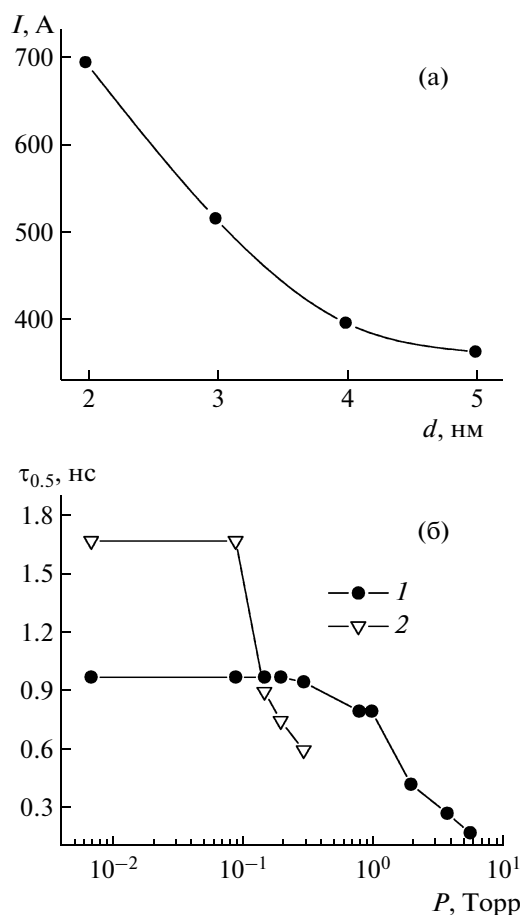


Рис. 1. Зависимости: **а** — амплитуды тока пучка от величины межэлектродного зазора в вакуумном диоде; **б** — длительности импульса тока пучка на полувысоте от остаточного давления воздуха в диоде ($d = 3$ мм) для первого (1) и второго (2) импульсов (см. текст).

Катодом служила трубка диаметром ~ 6 мм из стальной фольги толщиной 100 мкм. Вывод электронного пучка осуществлялся через анод, который был выполнен из Al-фольги толщиной 10 мкм. Расстояние d между анодом и катодом изменялось от 2 до 12 мм. За фольгой для ослабления тока пучка устанавливались сетки. В такой сборке генератора СЛЭП-150 амплитуда падающей волны напряжения в короткой передающей линии с волновым сопротивлением 100 Ом составляла ~ 130 кВ. Фронт импульса равнялся ~ 300 пс по уровню 0.1–0.9. Длительность импульса напряжения на полувысоте в случае согласованной нагрузки должна была составлять ~ 1 нс. Однако в месте соединения коаксиальной (формирующей) линии с волновым сопротивлением 30 Ом и передающей линии с волновым сопротивлением 100 Ом, а также на промежутке анод–катод возникали отражения, которые увеличивали длительность импульса напряжения и тока пучка при работе в режиме вакуумного диода.

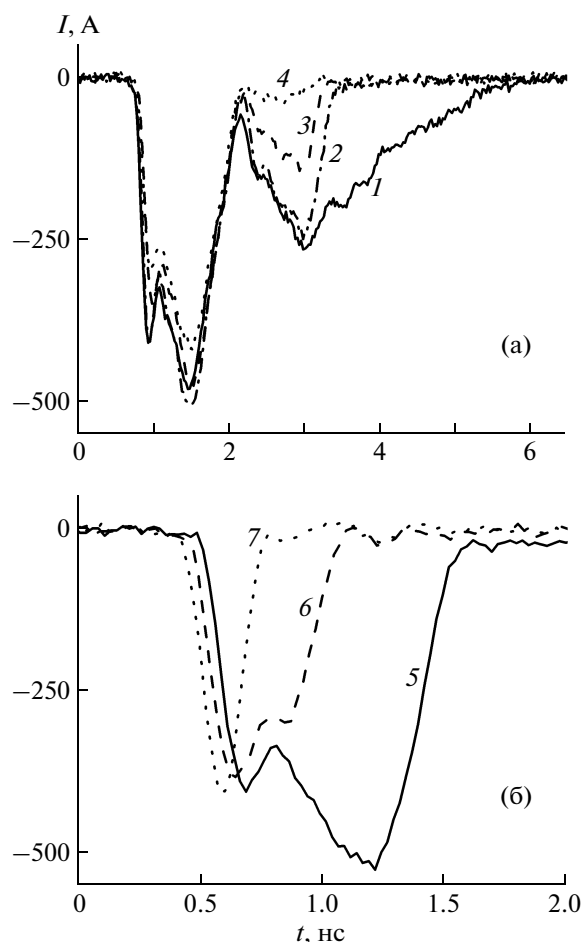


Рис. 2. Осциллограммы тока пучка при наличии воздуха в диоде ($d = 3$ мм) с различным остаточным давлением, Torr: 1 — $7 \cdot 10^{-3}$ – $9 \cdot 10^{-2}$; 2 — 0.15; 3 — 0.2; 4 — 0.3; 5 — 0.8; 6 — 2; 7 — 5.7.

Напряжение в передающей линии регистрировалось емкостным делителем. Ток короткого замыкания генератора измерялся с помощью шунта из чип-резисторов, а ток пучка электронов — с помощью коллектора, который состоял из металлического конуса, образующего с корпусом линию с волновым сопротивлением 50 Ом. Основание конуса, обращенное к фольге, имело диаметр 20 мм [9].

Сигналы с коллектора, емкостных делителей и шунтов подавались на цифровой осциллограф LeCroy WaveMaster 830Zi-A (30 ГГц, 80 выборок за 1 нс) посредством радиочастотных кабелей 5D-FB длиной ~ 1.3 м. Для ослабления электрических сигналов применялись аттенюаторы 142-NM фирмы Barth Electronics. Временное разрешение системы регистрации было не хуже 0.1 нс. Было проведено исследование влияния на амплитуду пучка электронов межэлектродного зазора и остаточного давления воздуха в вакуумном диоде.

На рис. 1а приведена зависимость амплитуды тока пучка от величины межэлектродного зазора

при откачке диода форвакуумным насосом и давлении в вакуумном диоде не выше 0.1 Торр. Амплитуда тока пучка увеличивалась при уменьшении межэлектродного зазора d и составила ~ 700 А при $d = 2$ мм. В отличие от работы [13], где использовался генератор РАДАН-220 с большей длительностью импульса и обострительным разрядником Р-49, в данной работе при применении генератора СЛЭП-150 и величине промежутка 2 мм за несколько десятков импульсов повреждения анодной фольги не отмечалось. При большем числе импульсов и меньших зазорах эксперименты не проводились. Для исследования основных режимов работы ускорителя был выбран зазор 3 мм, при котором за все время испытаний (более 10 тысяч импульсов) повреждений анодной фольги не наблюдалось.

Зависимость длительности импульса тока пучка на полувысоте от остаточного давления воздуха в диоде приведена на рис. 1б, а осциллограммы тока пучка — на рис. 2. При остаточном давлении ≤ 0.3 Торр регистрировались два импульса тока пучка с задержкой между максимумами ~ 1.5 нс (см. рис. 2а). Наибольшие амплитуды и длительности тока пучка при $d = 3$ мм были получены при откачке диода до давления ≤ 0.1 Торр, что соответствовало известному режиму работы ускорителя с вакуумным диодом.

В этих условиях реализовался режим работы диода, близкий к согласованному, а осциллограмма тока пучка состояла, как отмечено выше, из двух импульсов. Длительность фронта импульса тока до первого пика (максимума), который стабильно регистрировался в начале первого импульса тока пучка, составляла ~ 200 пс (см. рис. 2). Амплитуда второго максимума была больше, чем первого.

Появление второго импульса тока пучка (рис. 2а, см. осциллограммы 1–4) связано с отражением импульса напряжения, полученного в формирующей линии (волновое сопротивление 30 Ом), как от передающей линии (волновое сопротивление 100 Ом) и промежутка, так и от противоположного конца формирующей линии. Измерения показали, что с обострительными разрядниками типа Р-43 и Р-49 на генераторах СЛЭП-150, РАДАН-150 и РАДАН-220 без использования срезающего разрядника сложно получить с вакуумным диодом наносекундный импульс тока пучка, имеющий один пик. Имеется в виду импульс тока пучка, длительность которого примерно соответствует длине импульса высокого напряжения от формирующей линии.

Соотношение амплитуд первого и второго импульсов зависело от межэлектродного зазора. При зазоре в вакуумном диоде ≤ 3 мм амплитуда первого импульса превышала амплитуду второго, и ток пучка в первом импульсе увеличивался с уменьшением межэлектродного зазора. Как мы

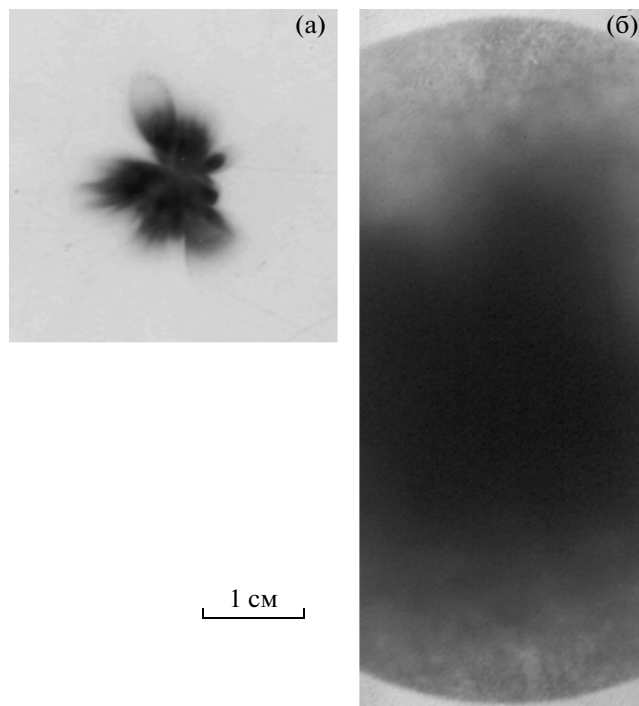


Рис. 3. Автограф электронного пучка: **а** — на пленке из винилпроза, получен за 20 импульсов при $d = 3$ мм и остаточном давлении воздуха в диоде ~ 0.1 Торр; **б** — на фотопленке РФ-3, помещенной в конверт из черной бумаги, получен за 1 импульс при $d = 12$ мм (давление воздуха в диоде 1 атм).

уже отмечали, при малых значениях d (≤ 4 мм) в начале первого импульса тока пучка регистрировался первый пик, который определял фронт импульса тока пучка (~ 0.2 нс). При зазоре 12 мм этот пик отсутствовал. Фронт первого импульса тока пучка увеличивался до ~ 500 пс, и его амплитуда значительно уменьшалась.

Кроме того, при больших зазорах появлялся третий импульс тока пучка, который обусловлен большим сопротивлением вакуумного диода и многократными отражениями импульса высокого напряжения от промежутка и от противоположного конца формирующей линии. Автограф электронного пучка на пленке из винилпроза, полученный за 20 импульсов при межэлектродном зазоре 3 мм и давлении в диоде ~ 0.1 Торр, приведен на рис. 3а. Этот автограф соответствует режиму работы вакуумного диода, см., например, работу [14].

При увеличении давления воздуха в диоде амплитуда тока пучка оставалась в первом пике первого импульса без изменения вплоть до давления ~ 6 Торр (см. рис. 2б). Как и при более низких давлениях, при $d = 3$ мм амплитуда тока пучка в первом пике составляла ~ 400 А. Средняя плотность тока при выводе его через диафрагму диаметром 1 см составляла ~ 500 А/см². Длительность им-

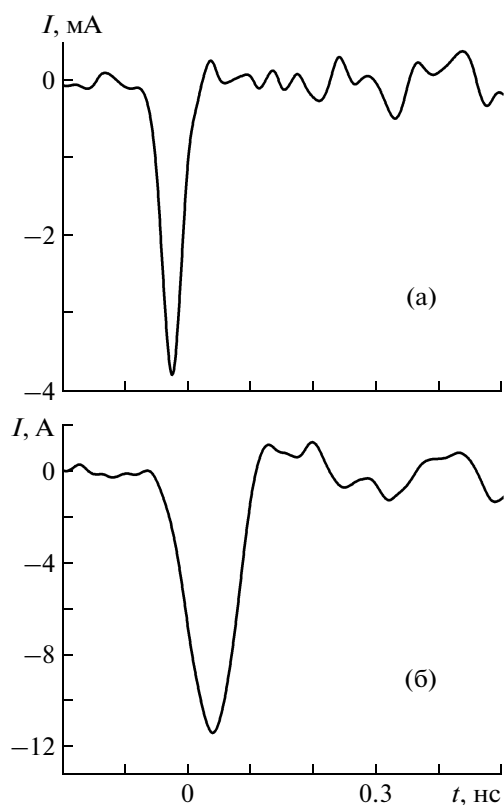


Рис. 4. Осциллограммы импульсов тока с.л.э.п. (давление воздуха в диоде 1 атм): **а** – сигнал получен за диафрагмой с отверстием диаметром 1 мм при зазоре $d = 4$ мм; **б** – диаметр отверстия в диафрагме равен 20 мм, $d = 12$ мм.

пulses тока пучка на полувысоте плавно уменьшалась с ростом давления воздуха и составила ~ 0.18 нс при давлении ~ 6 Торр. При дальнейшем увеличении давления воздуха длительность импульса на полувысоте продолжала снижаться, также начинала уменьшаться амплитуда тока пучка.

Осциллограммы импульсов тока с.л.э.п., полученные при атмосферном давлении воздуха, приведены на рис. 4. Длительность импульса тока пучка через отверстие $\varnothing 20$ мм в диафрагме, установленной за анодной фольгой, составила ~ 90 пс, а через отверстие $\varnothing 1$ мм в диафрагме толщиной 5 мм при зазоре $d = 4$ мм составила ~ 35 пс. Такие длительности характерны для режима работы газового диода, заполненного воздухом атмосферного давления [9, 10, 15]. Влияние давления различных газов на режим работы диода с межэлектродным промежутком $d = 12$ мм, который является оптимальным для газового диода с трубчатым катодом $\varnothing 6$ мм, подробно описано в работах [11, 12]. Автограф электронного пучка на фотопленке РФ-3, помещенной в конверт из черной бумаги, приведен на рис. 3б. Автограф получен за 1 импульс при межэлектродном зазоре 12 мм с диодом, заполненным воздухом атмосферного давле-

ния. Видно, что площадь автографа существенно больше.

Плотность тока пучка в условиях вакуумного диода с $d = 3$ мм при длительностях импульса тока пучка ≥ 0.18 нс была в ≥ 5 раз больше, чем при работе с тем же генератором и катодом в режиме газового диода с зазором $d = 12$ мм при давлении воздуха ~ 10 Торр. Однако при таком и больших давлениях длительность импульса тока пучка составляет ~ 100 пс. В режиме газового диода при атмосферном давлении воздуха импульсы тока пучка длительностью ~ 100 пс более просто получать со всей поверхности фольги [9–12], а менее 100 пс – с малых площадок анодной фольги [10, 15]).

Анализ полученных данных показывает, что генерация тока пучка при давлениях воздуха в диоде до ~ 6 Торр и зазорах несколько миллиметров происходит в режиме, характерном для вакуумного диода. Из осциллограмм импульсов тока пучка, приведенных при различных давлениях воздуха в диоде на рис. 2, и из зависимости на рис. 1б видно, что с увеличением давления воздуха вначале сокращается длительность второго импульса тока пучка вплоть до его полного исчезновения. Затем начинает сокращаться длительность первого импульса, что обусловлено шунтирующим пробоем промежутка катод–анод. Однако фронт импульса тока пучка при этом остается без изменения. Его длительность короче, чем фронт импульса напряжения, что типично для данных условий. При давлении воздуха в диоде ~ 6 Торр были получены примерно одинаковые длительности фронта и спада импульса тока пучка, которые соответствовали скорости изменения тока пучка $\sim 2 \cdot 10^{12}$ А/с. При этом начальная часть импульса тока пучка не изменялась, но остаточное давление воздуха влияло на задержку появления тока пучка относительно импульса напряжения. С увеличением давления воздуха эта задержка уменьшалась, что демонстрирует рис. 2б.

Уменьшение длительности импульса тока пучка обусловлено пробоем в диоде. Причем время пробоя составляет сотни пикосекунд. Для получения субнаносекундного времени шунтирования промежутка скорость распространения плазмы с катода, имеющего малый радиус кривизны, должна быть не менее $1.5 \cdot 10^9$ см/с.

Мы предполагаем, что данную скорость обеспечивает движение фронта волны ионизации по газу от катода, на котором концентрируется электрическое поле. Ток с катода эмитируется в этих условиях за счет взрывной эмиссии электронов [3]. Время формирования взрывоэмиссионных центров зависит от напряженности электрического поля [16]. Это приводит к уменьшению длительности фронта импульса тока пучка по сравнению с длительностью фронта импульса напряжения и

к сокращению фронта импульса тока пучка при малых зазорах в диоде.

Таким образом, проведенные исследования показали, что при субнаносекундной длительности фронта импульса напряжения и межэлектродных зазорах, оптимальных для вакуумных диодов, за счет напуска воздуха, а также других газов в диод можно регулировать длительность импульса тока пучка без уменьшения его амплитуды. С генератором СЛЭП-150 при амплитуде тока ≥ 400 А и его плотности ≥ 500 А/см² реализованы длительности импульсов на полувывоте от ~ 1 до 0.18 нс.

Сокращение длительности импульса тока пучка происходит за счет пробоя в ускорительном промежутке. При этом длительность спада импульса тока пучка не превышает 0.2 нс. Предполагается, что пробой промежутка происходит за счет фронта волны ионизации, скорость которого должна быть $\geq 1.5 \cdot 10^9$ см/с. При таком режиме можно получать субнаносекундные импульсы тока пучка с большой плотностью, используя сравнительно простые генераторы наносекундных импульсов, без установки дополнительных обострительного и срезающего разрядников. Применение газовых диодов по сравнению с вакуумными диодами имеет преимущества при формировании импульсов тока пучка с длительностью ≤ 100 пс. Однако плотности тока пучка и его амплитуды при таких длительностях импульса уменьшаются как для газовых, так и для вакуумных диодов.

Работа выполнена при частичной поддержке СО РАН, проект № 107 фундаментальных исследований, выполняемых ИСЭ СО РАН совместно с ИЭФ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии / Под ред. Г.А. Месяца. Новосибирск: Наука, 1983.
2. Желтов К.А. Пикосекундные сильноточные электронные ускорители. М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004.
4. Oks E.M. Plasma Cathode Electron Sources-Physics, Technology, Applications. Weinheim: Wiley-VCH, 2006.
5. Ковальчук Б.М., Месяц Г.А., Шпак В.Г. // ПТЭ. 1976. № 6. С. 73.
6. Желтов К.А., Пальчевский А.Ю., Пучков Ю.Д. // ПТЭ. 2009. № 4. С. 102.
7. Tarasenko V.F., Shpak V.G., Shunailov S.A., Kostyrya I.D. // Laser and Particle Beams. 2005. V. 23. № 4. P. 545.
8. Месяц Г.А., Коровин С.Д., Шарыпов К.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 1. С. 35.
9. Костыря И.Д., Бахит Е.Х., Тарасенко В.Ф. // ПТЭ. 2010. № 4. С. 84.
10. Костыря И.Д., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. // ПТЭ. 2012. № 1. С. 80.
11. Тарасенко В.Ф., Бахит Е.Х., Бураченко А.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 8. С. 60.
12. Tarasenko V.F., Baksh E.Kh., Burachenko A.G. et al. // IEEE Transaction Plasma Science. 2009. V. 37. № 6. P. 832.
13. Нагорный Д.Ю., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В. // ПТЭ. 1990. № 3. С. 175.
14. Бахит Е.Х., Костыря И.Д., Липатов Е.И. и др. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 4. С. 98.
15. Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф., Бураченко А.Г., Балзовский Е.В. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 14. С. 32.
16. Месяц Г.А., Яландин М.И. // Докл. РАН. 2009. Т. 424. № 6. С. 755.