

УДК 621.396.983

КЛИСТРОН — УДВОИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ С ПОПЕРЕЧНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ

А.А. КУРАЕВ, А.К. СИНИЦЫН, И.Н. ЦЫРЕЛЬЧУК

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 21 апреля 2008

Представлены результаты расчета многорезонаторных клистронов-удвоителей частоты с поперечной модуляцией электронов.

Ключевые слова: клистрон, удвоитель частоты, поперечная модуляция, многорезонаторная схема, КПД, усиление.

Введение

В работе [1] при исследовании гироклистронов был обнаружен эффект продольной группировки поперечно промодулированных по скорости электронных потоков, проходящих в продольно-неоднородном магнитном поле. Электроны, имеющие поперечную составляющую скорости, задерживаются в области дрейфа в неоднородном магнитном поле большее время, чем не имеющие поперечной скорости. Благодаря этому на выходе области дрейфа образуются электронные сгустки, частота прохождения которых через конечное сечение области дрейфа вдвое превышает частоту модуляции поперечной скорости. Это обусловлено тем, что время задержки электронов в области дрейфа зависит только от амплитуды поперечной скорости, но не от ее фазы. Поэтому процесс группировки повторяется дважды за период модуляции скорости. Использование этого механизма позволяет создавать высокоэффективные удвоители частоты [2–5], а также инжекторы для электронных ускорителей.

Ниже приведены результаты расчета многорезонаторных клистронов-удвоителей с поперечной модуляцией.

Схема прибора и принцип действия

На рис. 1,а приведена схема 2-х резонаторного клистрона с поперечной модуляцией. Инжектируемый электронной пушкой 1, релятивистский электронный поток (РЭП) 2 проходит по оси в резонатор C_1^m , в котором от внешнего источника возбуждено ВЧ-поле E_{110} с фиксированной поляризацией. Структура поля представлена на рис. 1,в. Здесь под действием поперечной составляющей ВЧ-магнитного поля РЭП получает поперечную модуляцию на относительной частоте $W_1 = \omega/\omega_0 = 0,5$ (ω_0 — частота выходного сигнала). Затем РЭП проходит в область дрейфа 4, в которой с помощью соленоида 5 создано неоднородное магнитное поле. На этом участке происходит трансформация поперечной составляющей скорости в продольную. Причем, электроны, получившие большую поперечную скорость, сильнее замедляются, что приводит к продольной модуляции по скорости и группировке по плотности. Ввиду того, что направление поперечной модуляции не влияет на процесс трансформации в продольную составляющую скорости (важен лишь модуль), группировка осуществляется

на удвоенной частоте сигнала $W_2=2W_1=1$. Перед входом в отбирающий резонатор \mathcal{C}_1^T с E_{010} -модой на частоте $W_2=1$ организовано понижение магнитостатического поля (рис. 1,б) с целью уменьшения поперечной составляющей скорости. Прошедшие отбиратель электроны оседают на коллекторе 3.

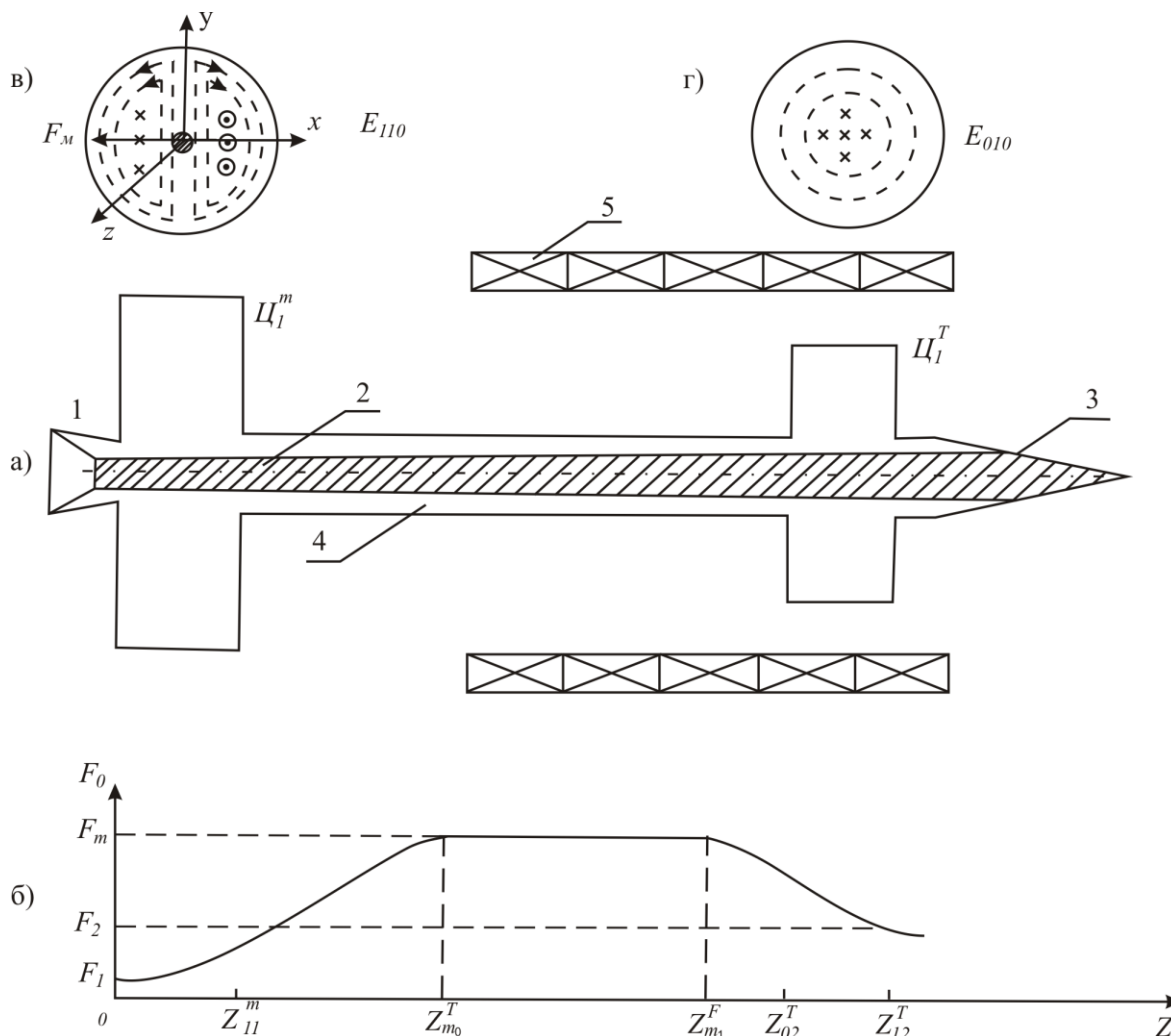


Рис. 1. Схема двухкаскадного клистрона с поперечной модуляцией

На рис. 2 представлена схема шестирезонаторного клистрона с двухкаскадным модулятором. Отклоненный от оси в области дрейфа $[z_{11}, z_{02}]$ РЭП возбуждает E_{110} -моду ВЧ-поля на частоте $W_2=0,5$ значительно большей амплитуды во втором холостом резонаторе \mathcal{C}_2^m модулятора. Под воздействием ВЧ-магнитного поля этой моды РЭП получает значительную поперечную модуляцию. После группировки в области дрейфа $[z_{12}^m, z_{03}^F]$ РЭП проходит через холостые догруппирующие резонаторы $\mathcal{C}_1^F, \mathcal{C}_2^F, \mathcal{C}_3^F$ с E_{010} -модой на частоте $W=1$ и после прохождения "выпрямляющего" участка $[z_{13}^T, z_{04}^T]$ с понижением магнитного поля отдает энергию в последнем резонаторе \mathcal{C}_1^T с E_{010} -модой на частоте $W=1$.

Качественный анализ процесса группирования поперечно промодулированного РЭП

Рассмотрим процесс группировки в области дрейфа 4 с неоднородным магнитным полем между модулятором и отбирателем (или первым догруппирующим резонатором). На вход модулятора подается прямолинейный РЭП с начальной скоростью $\beta_{z0}=\beta_0$.

После прохождения в ВЧ-поле модулятора РЭП на входе в область дрейфа приобретает периодическую модуляцию поперечной скорости на частоте $W=0,5$.

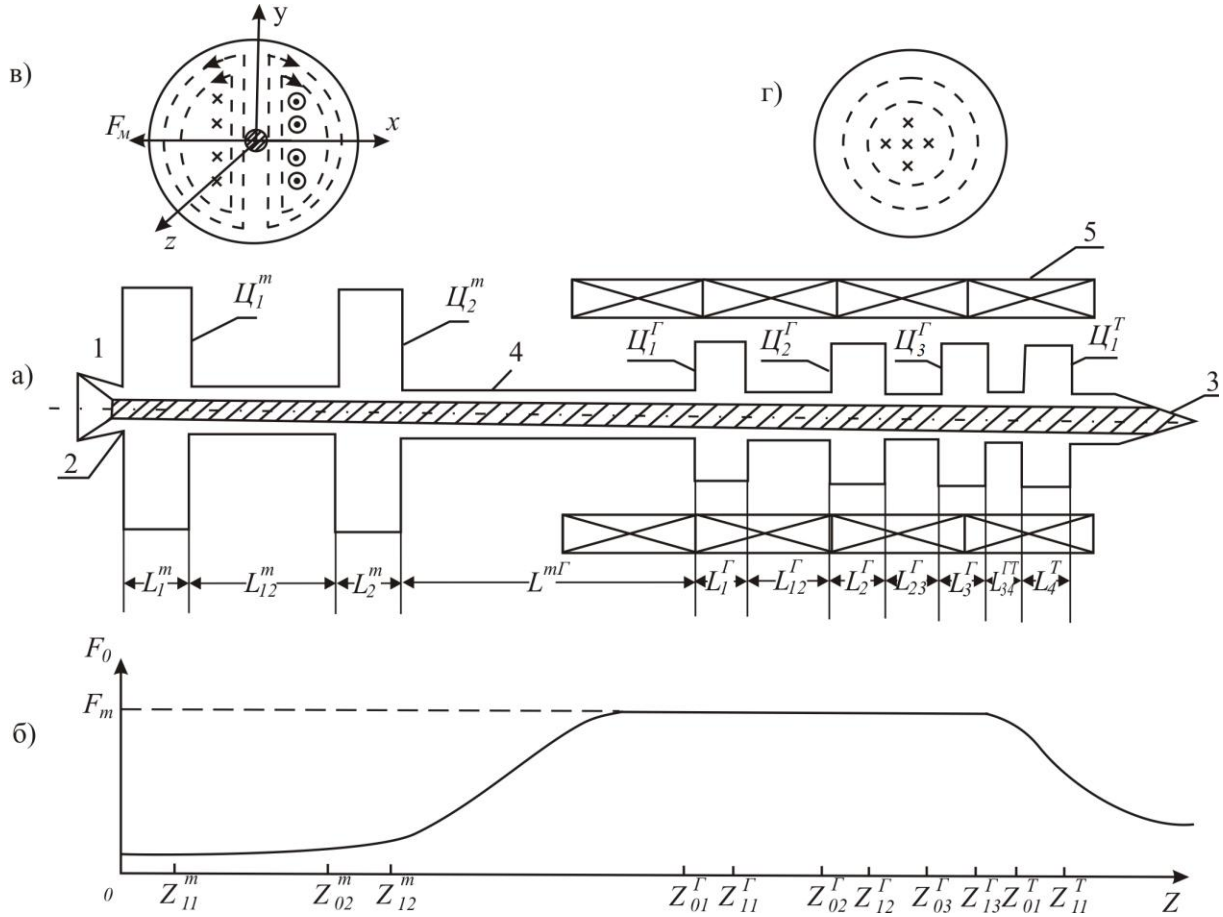


Рис. 2. Схема клистрона с поперечной модуляцией

$$\beta_t = \beta_{t1} \sin \frac{\theta_1}{2}; \beta_z = \sqrt{\beta_0^2 - [\beta_{t1} \sin(\theta_1/2)]^2}, \theta_1 = \omega_0 t W_1. \quad (1)$$

Допустим, что магнитное поле в области дрейфа меняется вдоль оси z медленно и воспользуемся адиабатическим вариантом:

$$\frac{\beta_t^2(z)}{F_0(z)} = \text{const}; \text{ или } \beta_t^2 = \frac{F_0(z)}{F_0(z_1)} \beta_{t1}^2 \sin^2 \frac{\theta_1}{2}, \quad (2)$$

получаем зависимость времени выхода электрона из области дрейфа θ_2 от времени входа θ_1 :

$$\theta_2 = \theta_1 + \frac{L_{12}}{\beta_0} \int_0^1 \frac{dT}{\sqrt{1 - q_{t1}^2 \sin^2(\theta_1/2) f(T)}}, \quad (3)$$

здесь:

$$T = \frac{z - z_1}{L_{12}}; f(T) = \frac{F_0(L_{12}T + z_1)}{F_0(z_1)}; q_{t1} = \frac{\beta_{t1}}{\beta_0}; \theta_{12} = \frac{L_{12}}{\beta_0}.$$

Предполагая $q_{t1}^2 f(T) \ll 1$, разложим подынтегральное выражение в ряд, проинтегрируем, ограничившись первым членом ряда, получим:

$$\theta_2 - \frac{L_{12}}{\beta_0} \left(1 - \frac{1}{4} q_{t1}^2 S_F\right) = \theta_1 - X_\omega \cos \theta_1; \quad (4)$$

здесь $X_\omega = \frac{1}{4} q_{r1}^2 \frac{L_{12}}{\beta_0} S_F$ — параметр группировки на частоте $W=1$. $S_F = \int_0^1 f(T) dT$ — площадь под кривой $f(T)$.

Из (4) видно, что при входе из области дрейфа частота сгустков равна удвоенной частоте модуляции. Без неоднородности магнитного поля $S_F=1$ и группировка имеет место вследствие начальной продольной модуляции (1). Величина параметра группировки зависит от площади S_F , форма кривой $f(T)$ при этом безразлична. Это указывает на то, что добиться улучшения группировки можно лишь увеличивая площадь S_F , не заботясь о ее форме. Сравнение выражения для параметров группировки X_ω в (4) с аналогичным выражением в клистроне с продольной модуляцией — удвоителе при $q_{z1}=q_{r1}$ показывает, что при $S_F=2/q_{r1}$ эффективность группировки одинакова. Заметим, что уменьшая $F_0(z_1)$, можно в принципе получить неограниченно большие S_F , однако для ограниченной длины L_{12} адиабатическое приближение становится неверным. Ввиду этого приведенные выкладки имеют качественный характер и нуждаются в уточнении для малых $F_0(z_1)$ и ограниченных L_{12} .

В клистроне с поперечной модуляцией особое значение приобретает вопрос о "распушении" пучка. Вследствие того, что электроны пучка после прохождения модулятора приобретают поперечную составляющую скорости, за время прохождения области дрейфа они могут значительно отклоняться от оси. Наличие продольного магнитного поля ограничивает это отклонение величиной двойного радиуса Ларморовской орбиты, который в адиабатическом приближении выражается через наши параметры следующим образом:

$$r(z) = \beta_r(z) \gamma_0 / F_0(z). \quad (5)$$

Используя адиабатический инвариант (2), получим формулы, выражающие $r(z)$ и $\beta_r(z)$ через β_{r1} :

$$r(z) = \frac{\beta_{r1} \gamma_0}{\sqrt{F_0(z_1) F_0(z)}}; \quad \beta_r(z) = \beta_{r1} \sqrt{F_0(z) / F_0(z_1)}. \quad (6)$$

Для оптимального отбора энергии желательно добиться $\beta_{r2}=\beta_r(z_2)=\min$; $r_2=r(z_2)=\min$. Эти условия, однако, противоречивы. Увеличивая $F_2=F_0(z_2)$ можно уменьшить r_2 , но β_{r2} при этом возрастает. Чтобы обеспечить прохождение пучка через зазоры резонаторов с приемлемым радиусом r_2 , придется F_2 выбирать из условия:

$$F_2 > \frac{4\gamma_0^2 \beta_{r1}^2}{F_1(r_2 - r_{01})}; \quad (7)$$

r_{01} — радиус пучка на входе в область дрейфа. Величина β_{r1} при этом может быть значительная и для ее уменьшения остается лишь уменьшить β_{r1} , увеличивая при этом длину L_{12} , чтобы обеспечить требуемую величину параметра группировки. Делать F_2 больше, чем это требуется для обеспечения прохода отверстий резонаторов отбирателя, нецелесообразно, ввиду увеличения β_{r2} и, следовательно, ухудшения условий отбора. Поэтому для увеличения S_F можно рекомендовать увеличение F_m и выбирать распределение F_0 , соответствующее рис. 1,б. Следует также иметь в виду, что для увеличения S_F необходимо $F_0(z_1)$ выбирать как можно меньше. Это приводит к тому, что на начальном участке области дрейфа, где магнитное поле еще мало, радиус пучка может оказаться значительным. Ввиду этого трубка дрейфа должна быть шире на начальном участке.

Варианты оптимизированных многорезонаторных клистронов с поперечной модуляцией

Выясненные выше закономерности группирования поперечно-промодулированного РЭП в неоднородном магнитном поле позволяют синтезировать варианты многорезонаторных клистронов с улучшенными характеристиками.

Как видно из (2), для достижения хорошей группировки в двухрезонанторном клистроне требуется значительная (как правило, неприемлемая) амплитуда сигнала ($A_1 \approx 0,3-0,5$), для обеспечения начальной поперечной модуляции $q_1 \approx 0,06-0,1$. Для уменьшения A_1 предлагается модулятор, состоящий из двух резонаторов U_1^m и U_2^m , настроенных на E_{110} -моду СВЧ-поля на частоте $W_1=W_2=0,5$ (рис. 2). СВЧ-сигнал, подводимый к первому резонатору U_1^m , возбуждает в нем E_{110} -моду. РЭП, проходя по оси резонатора в ВЧ-магнитном поле, под действием периодической силы \vec{F}_m (рис. 2,в), получает небольшое приращение поперечной скорости $\beta_{r1}(q_{r1}=\beta_{r1}/\beta_{z1})$.

После прохождения области дрейфа $[z_1, z_{02}]$ электроны РЭП, получившие поперечную составляющую скорости, отклоняются от оси и, пронизывая резонатор U_2^m , возбуждают в нем E_{110} -моду СВЧ-поля с амплитудой A_2 , достаточной для обеспечения необходимой глубины модуляции. Поляризация этой моды такова, что сила \vec{F}_{m2} во втором резонаторе противоположна силе \vec{F}_{m1} . В результате происходит перемодуляция поперечной составляющей β_r . Ввиду этого вряд ли целесообразно использование более двух каскадов в модуляторе, хотя и возможно.

Расчеты в кинематическом приближении показали, что при $L_{12} \approx 5,5$ возможно эффективное возбуждение второго резонатора до требуемой амплитуды, и при $L_{23}=80$ получена группировка $G_{r3}=0,58$, а $\eta_{e3}=0,49$. При этом амплитуда сигнала A_1 снижена до 0,03 ($A_2=0,25$) и коэффициент усиления $K_y \approx 55,5$ дБ. Заметим, что в двухрезонанторном клистроне при той же длине и $A_1=0,25$ достигается $K_y \approx 35$ дБ.

Для увеличения КПД используем ряд догруппирующих резонаторов (U_1^T, U_2^T, U_3^T на рис. 2), находящихся в однородном магнитном поле.

В результате подбора длин дрейфа, амплитуд и начальных фаз с помощью программы оптимизации были получены два варианта многорезонанторного клистрона с двухкаскадным поперечным модулятором и одним резонатором-отбирателем. Первый — пятирезонанторный клистрон, второй — шестирезонанторный (табл. 1, 2). В шестирезонанторном клистроне удалось несколько поднять КПД за счет введения дополнительного догруппирующего резонатора (характеристики первых каскадов у обоих вариантов идентичны). Кроме того, в последнем дрейфе шестирезонанторного клистрона введено понижение магнитного поля, в результате которого величина поперечной составляющей уменьшена в два раза ($q_\sigma=0,18$). Однако это привело к заметной расфокусировке РЭП, его радиус увеличился в 2,5 раза.

Таблица 1. Вариант пятирезонанторного клистрона с поперечной модуляцией

Параметры каскадов	U_1^m	U_2^m	U_1^T	U_2^T	U_3^T
A_k	0,01	0,25	0,35	0,45	1,45
ϑ_k	$-\pi/2$	-0,336	-1,00	3,886	1,912
η_{vk}	-1,36E-7	2,4E-4	4,9E-4	5,4E-4	0,53
L_k	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
$L_{k, k+1}$	5	60	17	16	-
Q_k	-	13060	2075	3120	36
φ_k	-	1E-4	0,092	0,034	2,5E-3
G_{rk}	-	-	0,29	0,43	0,64
r_{0k}	0	0,015	0,25	0,43	0,4/0,53
q_k	0	2,6E-3	0,311	0,32	0,31

$$\beta_0=0,941; I_0=150 \text{ A}; K_y=66; \eta_\Sigma=0,53; L_\Sigma=105,5; F_1=0; F_m=4; F_2=4;$$

$$\beta_0=0,941; I_0=150 \text{ A}; K_y=66; \eta_\Sigma=0,60; L_\Sigma=119; F_1=0; F_m=4; F_2=1.$$

Для сравнения по единой методике был получен оптимальный вариант классического шестирезонанторного клистрона с продольной модуляцией и одним резонатором-отбирателем (табл. 3). В этом варианте достигнут несколько больший КПД ($\eta_\Sigma=0,67$), однако, суммарная длина при этом оказалась в 1,5 раза большей, коэффициент усиления чуть ниже.

Таблица 2. Вариант шестирезонаторного клистрона с поперечной модуляцией

Параметры каскадов	U_1^m	U_2^m	U_1^r	U_2^r	U_3^r	U_1^T
A_k	0,01	0,25	0,35	0,45	1,50	1,64
ϑ_k	$-\pi/2$	-0,336	-1,00	3,88	3,46	-0,42
η_{vk}	-1,36E-7	2,4E-4	4,9E-4	5,4E-4	6,7E-4	0,60
L_k	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
$L_{k, k+1}$	5	60	17	16	12,2	-
Q_k	-	13060	2074	3175	3173	38
φ_k	-	1E-5	0,034	0,039	0,05	3,0E-3
G_{rk}	-	-	0,29	0,44	0,63	0,69
r_{0k}	0	0,015	0,25	0,43	0,43	1,8/1,2
q_k	0	6,4E-2	0,36	0,40	0,40	0,18

Таблица 3. Вариант шестирезонаторного пролетного клистрона

Параметры каскадов	U_1^m	U_1^r	U_2^r	U_3^r	U_σ^r	U_1^T
A_k	0,01	0,24	0,35	0,45	0,55	1,61
ϑ_k	$-\pi/2$	-0,248	2,62	3,53	-0,57	-0,4
η_{vk}	-4,36E-7	5,0E-4	9,1E-4	5,0E-4	5,0E-4	0,67
L_k	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
$L_{k, k+1}$	50	43	21	20	20	-
Q_k	1941	975	1139	3429	5122	32
φ_k	0	1,8E-3	0,026	0,029	0,037	2,3E-3
G_{rk}	0	1,1E-2	0,222	0,333	0,491	0,675

$\beta_0=0,941$; $I_0=150$ А; $K_y=55$; $\eta_\Sigma=0,67$; $L_\Sigma=163$.

Если учесть, что клистрон с поперечной модуляцией является естественным удвоителем частоты, в этом плане его преимущества несомненны.

KLYSTRON-FREQUENCY DOUBLER WITH LATERAL ELECTRON MODULATION

A.A. KURAYEV, A.K. SINITSYN, I.N. TSYRELCHUK

Abstract

The results of calculation of multiresonator klystrons-frequency doubler with lateral electron modulation are represented.

Литература

1. Жураховский В.А., Кураев А.А. // Радиотехника. Изд. ХГУ. 1971. Вып. 18. С. 62–65.
2. Кураев А.А., Пармонов Б.М. // Радиотехника и электроника. 1982. Т. 27, № 7. С. 1403–1407.
3. Кураев А.А., Синицын А.К. // Докл. АН БССР. 1989. Т. 33, № 7. С. 614–616.
4. Кураев А.А., Пармонов В.М., Синицын А.К. // Радиотехника и электроника. 1991. Вып. 5. С. 942–951.
5. Кураев А.А., Пармонов Б.М., Синицын А.К. А.С. СССР № 1526501.