

04;09

Кинетика электронов в плазме разряда, создаваемого в свободном пространстве сфокусированным СВЧ пучком

© А.А. Кузовников, В.М. Шибков, Л.В. Шибкова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 14 августа 1995 г. В окончательной редакции 30 сентября 1996 г.)

Изучена кинетика электронов в плазме разряда, создаваемого мощным сфокусированным пучком электромагнитного излучения сантиметрового диапазона длин волн в условиях приближенных к свободному пространству, когда размеры камеры намного превышают длину волны СВЧ излучения. Исследованы два режима создания разряда: режим коротких микросекундных импульсов, следующих с частотой повторения 200 Гц, и режим одиночного миллисекундного импульса. Показано, что при пороговых плотностях потока СВЧ энергии концентрация электронов на начальных стадиях формирования разряда достигает критического значения, а средняя энергия электронов порядка 1.5–3 эВ.

В конце 40-х годов были созданы СВЧ генераторы непрерывного действия киловаттной мощности, что позволило получить длительно существующие СВЧ разряды атмосферного давления и привело к интенсивному исследованию в новой области физики плазмы — физики СВЧ разряда. В [1] исследовано возникновение и распространение разряда в волноводе в воздухе при непрерывном режиме работы СВЧ генератора. Если в каком-нибудь месте волновода тем или иным способом возбудить разряд, то плазменное образование движется по направлению к генератору, навстречу СВЧ волне. В плазме поглощается примерно 75% мощности падающей волны. Поддержание такого разряда возможно при СВЧ мощности, на несколько порядков величины меньшей, чем требуется для пробоя атмосферного воздуха, а скорость движения разряда монотонно возрастает при увеличении мощности. В [2] дана физическая интерпретация этого явления на основе представлений о распространении разряда в режиме медленного горения. Подвод СВЧ энергии к плазме возможно также осуществить другим способом [3]. В волновод прямоугольного сечения (волна типа H_{01}) перпендикулярно его широкой стенке вставляется диэлектрическая трубка из материала, прозрачного в СВЧ диапазоне, например кварцевая. В области пересечения с волноводом в трубке зажигается разряд. Плазма поддерживается за счет диссипации в ней энергии бегущей электромагнитной волны. Выделяющееся тепло либо уносится продуваемым через трубку потоком газа, либо отводится за счет теплопроводностного процесса в охлаждаемые стенки трубки.

Однако специфика СВЧ диапазона позволяет проводить эксперименты в свободном пространстве в отсутствие контакта разряда со стенками камеры и электродами. В [4] разряд создавался в резонаторе, в котором возбуждаются стоячие электромагнитные волны типа E_{01} . Структура поля при этом такова, что электрическое поле на оси направлено вдоль нее и изменяется по синусоидальному закону, а по радиусу поле спадает при удалении от оси. Разряд поджигался на оси в области

максимального поля. Плазма вытягивалась вдоль вектора электрического поля и при больших мощностях имела вид шнура. В целях предотвращения всплывания разряда под действием архимедовой силы и придания плазменному шнуру устойчивости газ в резонаторе закручивался.

Успехи в развитии электроники сверхвысоких частот привели к возможности создания новой формы разряда — безэлектродного СВЧ разряда в сфокусированном пучке электромагнитной энергии в свободном пространстве [5–21]. Сильная пространственная неравномерность выделения энергии вблизи электродов является одной из основных причин неустойчивости разрядов [22]. Переход к безэлектродным системам может повысить стабильность и увеличить энерговыход в газовый разряд. Несамостоятельный СВЧ разряд в свободном пространстве обладает относительно высокой пространственной однородностью энерговыделения и дает возможность независимо регулировать в относительно широких пределах параметры плазмы. Отсутствие контактов с твердыми телами делает применение самостоятельных СВЧ разрядов весьма перспективными и для задачи получения особо чистых веществ в плазмохимии.

Под воздействием мощного сфокусированного пучка электромагнитных волн СВЧ диапазона при условии, что напряженность электрического поля превышает пороговое значение, в фокальной области разрядной камеры происходит пробой газа. После пробоя, образовавшаяся в фокусе пучка плазма начинает интенсивно поглощать подводимую к разряду энергию таким образом, что электроны, получая энергию от СВЧ поля, передают ее при столкновениях с молекулами нейтральному газу. Энергия, выделяющаяся в газе, распределяется по всем степеням свободы (колебательной, вращательной, поступательной, электронное возбуждение молекул, диссоциация и др.), что в свою очередь в зависимости от условий, которыми можно управлять, приводит к возникновению неравновесности в плазме и различных газодинамических возмущений. С целью усовершенствования теоретических моделей, применяемых для опи-

сания эволюции в пространстве и времени разряда в волновых полях, требуется получение в широком диапазоне изменения внешних условий надежных сведений о параметрах заряженной и нейтральной компонент нестационарной неравновесной плазмы. Для этого необходимо проведение комплексных измерений различными по возможности бесконтактными методами основных параметров безэлектродного СВЧ разряда. Оптическая диагностика позволяет получать с высоким пространственно-временным разрешением данные о параметрах свободно локализованного СВЧ разряда в воздухе и в наибольшей степени отвечает этим требованиям.

Для измерения концентрации и температуры электронов в данной работе использовалась модификация [19] предложенного в [23] метода одновременного определения n_e и T_e в неизоэнтальной азотной плазме по измерению абсолютных интенсивностей излучения полос второй положительной и первой отрицательной систем азота для условий, когда возбуждение рассматриваемых полос происходит прямым электронным ударом, а рассеяние состояний — за счет радиационных переходов. Для нахождения абсолютных значений заселенностей исследуемых уровней использовался фотоэлектрический метод определения яркости излучения по сравнению с яркостью эталонного источника сплошного спектра.

СВЧ разряд в сфокусированном пучке электромагнитных волн, который является объектом исследования в работе, создавался на двух стендах в условиях, приближенных к свободному пространству, когда размер камеры R был много больше длины λ волны СВЧ излучения. В качестве источников СВЧ энергии использовались на первом стенде импульсный магнетронный, на втором — клистронные генераторы сантиметрового диапазона длин волн. Магнетронный генератор первого стенда имел следующие характеристики: длина волны $\lambda_2 = 2.4$ см, отдаваемая в тракт СВЧ мощность $W \leq 600$ кВт, длительность СВЧ импульсов на уровне 0.5 амплитудного значения $\tau_u = 5-200$ мкс. Генератор мог работать либо в разовом режиме, либо в режиме частых посылок импульсов со скважностью 1000.

На первом стенде СВЧ энергия поступала в разрядную камеру по волноводному тракту. Во избежание электрического пробоя волновода последний наполнялся элегазом при давлении до 6 атм. Весь тракт был герметизирован. Ввод СВЧ энергии в камеру производился через конусное соединение. Прямоугольный волноводный тракт оканчивался переходом на круглое сечение. Из этого элемента волноводного тракта волна типа H_{11} направлялась в переходной конус. Раструб конуса заканчивался полистироловой линзой диаметром 0.6 м с фокусным расстоянием 0.8 м. Разряд создавался в цилиндрической барокамере, при этом вакуумная система позволяла производить интересные нас исследования в широком диапазоне давлений от 10^{-5} до 760 Тор. Роль вакуумирующего элемента между камерой и волноводным трактом выполняла фокусирующая линза. Внутренний диаметр вакуумной камеры 1 м, длина 3 м. Получение

СВЧ разряда осуществлялось в режиме бегущей волны. Для согласования в торце разрядной камеры напротив линзы устанавливалась стенка из СВЧ поглотителей.

Технические параметры и функциональные возможности многопрофильной экспериментальной установки второго стенда подробно описаны в [24]. Установка представляет собой 36-канальное передающее устройство, работающее на симметричную рупорную антенную решетку и обеспечивающее в сантиметровом диапазоне длин волн синфазное сложение излучения внутри объема экспериментальной камеры. Основным элементом каждого из каналов являются усилительные клистроны 100 кВт. Фазирование излучения отдельных рупоров антенной решетки установки производится внутри объема расположенной горизонтально цилиндрической камеры диаметром 1 м с длиной образующей 3 м. Ввод излучения в камеру осуществляется через радиопрозрачное полиэтиленовое окно диаметром 1 м, расположенное на обращенной к антенной решетке стороне камеры. Режим бегущей волны излучения в камере обеспечивается экранировкой металлических частей ее внутренней поверхности радиопоглощающим устройством. Клистронные генераторы имели следующие характеристики: длительность СВЧ импульсов менялась в пределах 1–800 мкс; установка могла работать либо в разовом режиме, либо в режиме повторяющихся с частотой 0.5–10 Гц импульсов; угол сходимости пучка 50° ; радиус фокальной области порядка длины волны (частота СВЧ излучения $\nu \approx 7$ ГГц); плотность потока энергии в фокальной области $S \leq 10^5$ Вт/см².

Измерения концентрации и температуры электронов в плазме "бегущего" СВЧ разряда (на втором стенде $\nu \approx 7$ ГГц) проводились в азоте особой чистоты. Разрядная камера откачивалась до давлений, меньших 10^{-3} Тор с последующим напуском азота до нужного давления. На рис. 1 приведены полученные зависимости концентрации и температуры электронов от давления азота при пороговых значениях СВЧ мощности, подводимой к разрядной

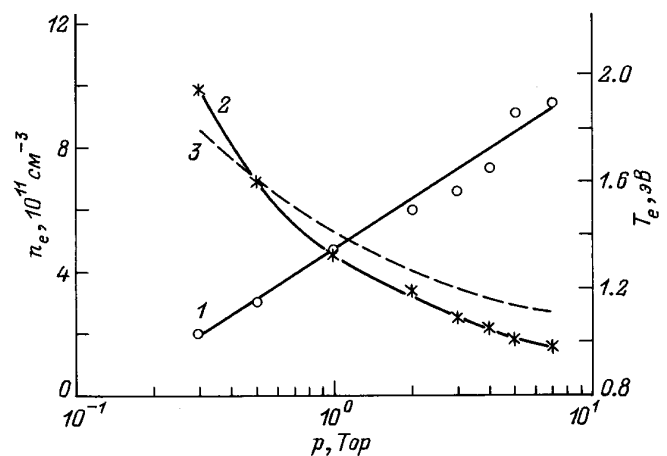


Рис. 1. Зависимость от давления концентрации (1) и температуры (2 — эксперимент, 3 — расчет) электронов в плазме свободно локализованного СВЧ разряда в азоте ($\nu \approx 7$ ГГц).

камере. Видно, что в условиях эксперимента в азоте особой чистоты концентрация электронов достигает критического значения n_{ec} .

Полученные нами результаты не противоречат данным численного счета [11], где приводится описание эволюции начальной стадии разряда с помощью модели [12], в которой поле осесимметричного волнового пучка $E(r, z, t) \exp[i(\omega t - kz)]$ описывается параболическим уравнением, учитывающим рефракцию на малые углы, поперечную диффузию и поглощение, а электронная концентрация $n_e(r, z, t)$ — уравнением баланса простейшего вида с заданной амплитудной зависимостью частоты ионизации $\nu_i(|E|) \simeq |E|^\beta$ и заданной эффективной частотой потерь $\nu_a = \text{const}$. В расчетах [11] радиальная r и продольная z координаты отнесены соответственно к характерному поперечному a и продольному $l_F = ka^2$ масштабу фокальной области невозмущенного пучка, угол сходимости которого $\Theta = (ka)^{-1}$, $n_{ec} = m(\omega^2 + \nu_e^2)/4\pi e^2$ — критическая концентрация, ν_e — частота столкновений электронов с молекулами газа. Начальные и граничные условия задавались таким образом, чтобы в допробойном состоянии ($t = 0$) концентрация была малой: $n_e(r, z, t) = n_0 = \text{const}$, а пучок гауссовым и фокусировался на заданном расстоянии z_0 от границы $z = 0$. В условиях нашего эксперимента ($\Theta \simeq 0.3$) оценки по данным [11] дают отношение $n_{\text{max}}/n_{ec} \simeq 1$, что хорошо согласуется с полученными нами результатами.

При изменении давления от 0.3 до 7 Тор концентрация электронов увеличивается от $\sim 2 \cdot 10^{11}$ до $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$, а температура электронов T_e уменьшается от ~ 2 до ~ 1 эВ. Этот диапазон давлений приходится на минимум пробойной кривой, поэтому с увеличением давления поле в плазме остается практически постоянным, а величина $E_{\text{эф}}/n$ уменьшается, что и приводит, как показывает эксперимент (рис. 1, кривая 2) и расчет по нестационарной кинетической модели [17,25] (кривая 3), к падению средней энергии электронов.

Выяснить вопрос, как изменяются концентрация и температура электронов в одном выбранном нами плаз-

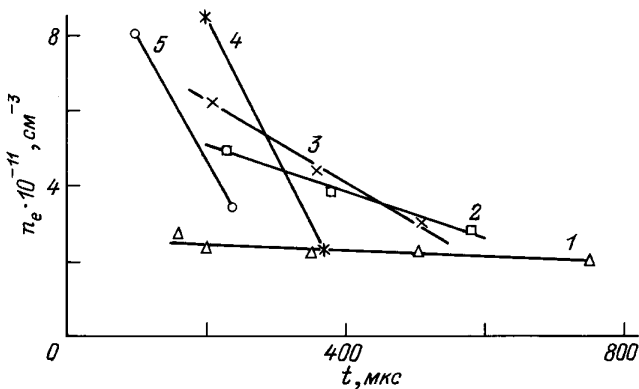


Рис. 2. Временной ход концентрации электронов в плазме бегущего СВЧ разряда в азоте: $\nu = 7 \text{ ГГц}$; $p, \text{Тор}$: 1 — 0.3, 2 — 1, 3 — 2, 4 — 3, 5 — 7.

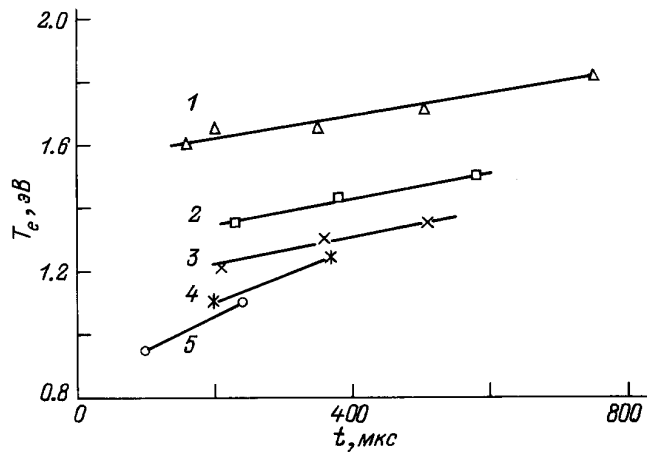


Рис. 3. Временной ход температуры электронов в плазме бегущего СВЧ разряда в азоте: $\nu = 7 \text{ ГГц}$; $p, \text{Тор}$: 1 — 0.3, 2 — 1, 3 — 2, 4 — 3, 5 — 7.

моиде, создаваемом на втором стенде, в течение импульса СВЧ мощности не удалось, так как плазмоид, образовавшийся в фокусе, не стоит на месте, а движется по направлению к фокусирующей антенне, уходя из поля зрения спектрального прибора. Применяемая нами оптическая система проецирует изображение плазмоида на входную щель монохроматора один к одному (с увеличением равным единице). Поэтому на фотокатод фотоумножителя попадает лишь излучение из областей плазмоида, равных площади входной щели. При движении плазмоидов в направлении, противоположном направлению распространения энергии в сфокусированном СВЧ пучке, они последовательно попадают в данное место разрядной области, что дает возможность выяснить, как ведут себя концентрация и температура электронов в одном и том же месте разрядной области, но в различных плазмоидах в разные моменты времени СВЧ импульса. Результаты измерений при различных давлениях азота $p = 0.1\text{--}10 \text{ Тор}$ приведены на рис. 2 (n_e) и 3 (T_e). Из рисунков видно, что концентрация к концу импульса уменьшается, а температура электронов растет, причем при увеличении давления газа n_e и T_e изменяются во времени быстрее, чем при низких давлениях.

Рост температуры электронов в течение импульса объясняется следующим образом. В первые моменты времени СВЧ импульса нижние колебательные уровни азота заселены еще слабо и удары второго рода играют малую роль, энергия электронов в основном идет на возбуждение этих уровней, поэтому T_e остается невысокой. С течением времени, по мере удлинения СВЧ импульса, в принципе возможно достаточно большое заселение нижних колебательных уровней и начинают играть заметную роль удары второго рода, что, как показывают результаты математического моделирования, может приводить к росту температуры электронов [25]. Уменьшение концентрации электронов к концу СВЧ импульса объясняется влиянием нагрева газа [16]. Газ за

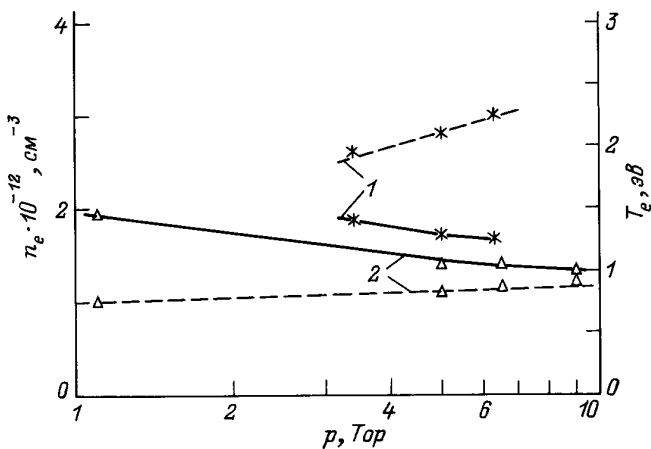


Рис. 4. Зависимость от давления газа концентрации (штриховые кривые) и температуры (сплошные кривые) электронов в плазме безэлектродного СВЧ разряда в азоте (1) и воздухе (2) ($\lambda = 2.4$ см).

время порядка сотен микросекунд успевает прогреться и молекулы азота начинают уходить из области, занятой плазмой. Это приводит к обеднению зоны существования СВЧ разряда нейтральными молекулами, следствием чего является уменьшение концентрации электронов.

На рис. 4 приведены экспериментально полученные на первом стенде зависимости от давления газа концентрации и температуры электронов в плазме "бегущего" СВЧ разряда. Длина волны СВЧ излучения 2.4 см, длительность импульсов 5 мкс, частота повторения 200 Гц. Измерения проводились при пороговом уровне подводимой СВЧ мощности. Видно, что, так же как и в предыдущем случае ($\nu \approx 7$ ГГц), концентрация электронов с увеличением давления растет, а температура электронов падает. Причем концентрация электронов в плазме "бегущего" СВЧ разряда в азоте несколько выше, чем в воздухе, что объясняется наличием эффективного канала гибели электронов в воздухе за счет прилипания их с образованием отрицательных ионов кислорода.

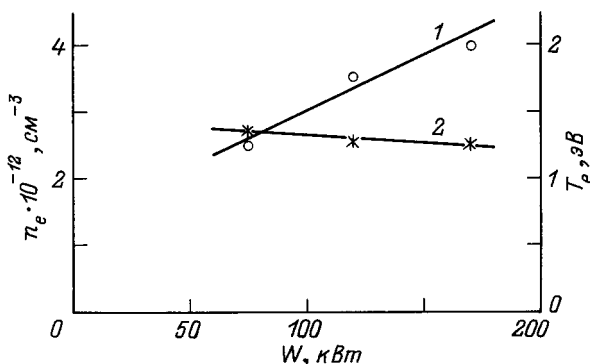


Рис. 5. Зависимость от уровня СВЧ мощности концентрации (1) и температуры (2) электронов в плазме свободно локализованного разряда в азоте $p = 5$ Тор ($\lambda = 2.4$ см).

На первом стенде проводились также измерения n_e и T_e при различных уровнях подводимой к разряду мощности. На рис. 5 представлены зависимости $n_e(W)$ и $T_e(W)$. Видно, что концентрация электронов с увеличением мощности растет, а температура несколько падает.

Из сравнения экспериментально найденных значений n_e со значениями критической концентрации n_{ec} для исследуемых диапазонов СВЧ излучения видно, что измеренные значения концентрации электронов в плазме свободно локализованного разряда, создаваемого сфокусированным СВЧ пучком, порядка n_{ec} . Полученные значения средней энергии электронов $\varepsilon \approx 1.5-3$ эВ хорошо согласуются со средней энергией, отвечающей рассчитанным [25] из нестационарного кинетического уравнения Больцмана функциям распределения электронов по энергиям при значениях приведенного электрического поля E_{cf}/n , соответствующих условиям эксперимента.

Список литературы

- [1] *Beust W., Ford W.L.* // Microwave J. МТТ. 1961. Vol. 10. P. 91–99.
- [2] *Райзер Ю.П.* // ЖЭТФ. 1971. Т. 61. Вып. 1(7). С. 222–234.
- [3] *Батенин В.М., Климовский И.И., Лысов П.В., Троцкий В.Н.* Сверхвысокочастотные генераторы плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1988.
- [4] *Капица П.Л.* // ЖЭТФ. 1969. Т. 57. Вып. 6(12). С. 1801–1866.
- [5] Высокочастотный разряд в волновых полях / Под ред. А.Г. Литвака. Горький: ИПФ АН СССР, 1988. 297 с.
- [6] Strong microwave in plasmas / Ed. A.G. Litvak. Nizhny Novgorod: IAP AS USSR, 1991. 732 p.
- [7] *Батанов Г.М., Грицинин С.И., Косый И.А.* и др. // Тр. ФИАН СССР. 1985. Т. 160. С. 174–203.
- [8] *Аскарьян Г.А., Батанов Г.М., Косый И.А.* и др. // Физика плазмы. 1991. Т. 17. № 1. С. 85–96.
- [9] *Гильденбург В.В., Голубев С.В.* // ЖЭТФ. 1974. Т. 67. Вып. 1. С. 89–93.
- [10] *Гильденбург В.В., Семенов В.Е.* Нелинейные волны. Структуры и бифуркации. М.: Наука, 1987. 376 с.
- [11] *Вихарев А.Л., Гильденбург В.В., Голубев С.В.* и др. // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. Вып. 4. С. 136–145.
- [12] *Sildenburg V.B., Litvak A.G., Yunakovsky A.D.* // J. de Physique. 1979. Vol. 40. N C7. P. 215–216.
- [13] *Бровкин В.Г., Колесниченко Ю.Ф.* // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. Вып. 1. С. 58–61.
- [14] *Зарин А.С., Куликов В.Н., Мишук В.Е.* // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. Вып. 22. С. 1373–1374.
- [15] *Злобин В.В., Кузовников А.А., Шибков В.М.* // Вестник МГУ. Физика, астрономия. Сер. 3. 1988. Т. 29. № 1. С. 89–91.
- [16] *Девятов А.М., Кузовников А.А., Лодинев В.В., Шибков В.М.* // Вестник МГУ. Физика, астрономия. Сер. 3. 1991. Т. 32. № 2. С. 29–33.
- [17] *Шибков В.М., Александров А.Ф., Кузовников А.А.* // Шаровая молния. М.: Химия, 1994. С. 136–150.
- [18] *Арманд Н.А., Зарин А.С., Мишук В.Е.* и др. // Радиофизика / Под ред. Г.И. Бацких. М.: МРТИ АН СССР, 1991. С. 135–142.

- [19] *Shibkov V.M.* // Proc. XX ICPIG. Contrib. Papers. Risa, 1991. Paper 5. P. 1137–1140.
- [20] *Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И.* и др. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 2. С. 389–391.
- [21] *Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Федотов А.Б.* // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 10. С. 149–154.
- [22] *Андреева М.Н., Персианцев И.Г., Письменный В.Д.* и др. // Физика плазмы. 1977. Т. 3. № 6. С. 1383–1389.
- [23] *Бердичевский М.Г., Марусин В.В.* // ЖПС. 1973. Т. 18. № 6. С. 1055–1057.
- [24] *Бацких Г.И., Хворостяной Ю.И.* // РиЭ. 1992. Т. 37. № 2. С. 311–315.
- [25] *Alexandrov A.F., Kuzovnikov A.A., Shibkov V.M., Zarin A.S.* Strong Microwave in Plasmas / Ed. A.G. Litvak. Nizhny Novgorod: IAP RAS (Russia), 1994. Vol. 1. P. 281–286.