

Широкоапертурный ХеСl-лазер с энергией излучения ~ 2 кДж

С.П.Бугаев, Э.Н.Абдуллин, В.Б.Зорин, Б.М.Ковальчук, С.В.Логинов,
Г.А.Месяц, В.С.Скакун, В.Ф.Тарасенко, В.С.Толкачев, П.М.Щанин

Приведены результаты исследований ХеСl-лазера ($\lambda = 308$ нм) с активным объемом 600 л. Для накачки использовался ускоритель с вакуумной изоляцией, формирующий радиально-сходящийся электронный пучок. При накачке смеси Ar–Хе–НСl получены энергия излучения 1.9 кДж и мощность ~ 7 ГВт. Длительность импульса излучения на полувысоте составила ~ 250 нс.

Ключевые слова: ХеСl-лазер, накачка пучком электронов, энергия генерации.

1. Введение

В настоящее время продолжают исследования и разработки мощных лазерных систем, использующих эксиплексные лазеры на галоидах благородных газов [1–5]. Лазерные системы включают в себя задающий генератор и несколько усилителей. Последний (оконечный) усилитель – это обычно широкоапертурный лазер с накачкой электронным пучком [1–7]. В большинстве известных широкоапертурных эксиплексных лазеров с накачкой пучком электронов [1–4, 6] высокие мощности накачки достигались за счет применения промежуточных водяных линий, которые заряжались от импульсных генераторов. Использование дополнительного накопителя энергии усложняет конструкцию установки.

В Институте сильноточной электроники СО РАН (Томск) были созданы ускорители электронов, в которых благодаря применению вакуумной изоляции удалось существенно уменьшить индуктивность генератора накачки и вакуумного диода [8, 9]. Это позволило создать компактные широкоапертурные эксиплексные лазеры [5, 10–12] с прямой накачкой от генераторов Маркса с вакуумной изоляцией. В этих лазерах возбуждение осуществлялось четырьмя [5, 10] и шестью [5, 11, 12] радиально-сходящимися пучками.

В настоящей работе проведены детальные исследования накачиваемого радиально-сходящимся электронным пучком широкоапертурного ХеСl-лазера, в котором за счет применения вакуумной изоляции используется одноконтурная схема генератора накачки.

2. Конструкция лазера и методики измерений

Схема установки показана на рис.1. Ускорительный комплекс установки содержит 12 вакуумных диодов, питающихся от 12 генераторов импульсных напряжений

(ГИН) и размещенных по конструктивной схеме, представляющей собой двухэтажную шестилучевую звезду [9]. В ускорительных модулях используются катоды с гладкой эмиттирующей поверхностью из карботекстима ПУ, покрытые бархатом. Электронные пучки от всех ускорительных модулей инжектируются в газовый объем лазерной камеры через систему разделительных окон, укрепленных на трубе с внешним диаметром 62 см. Остаточное давление в корпусе ускорителя не превышало 2×10^{-3} Па при избыточном давлении в лазерной камере до 3 атм. Это достигалось параллельной работой трех вакуумных агрегатов АВП-400/1600, каждый из которых имел скорость откачки 3000 л/с.

Коммутаторы всех 12 ГИНов (96 штук) работали на смеси сухого воздуха и элегаза в соотношении 70 : 30 при общем давлении 1.3–1.7 атм, конденсаторы заряжались до напряжения 70–95 кВ. Управление ГИНов обеспечивалось использованием 12 воздушных многоазорных разрядников и такого же числа импульсных трансформаторов на коаксиальных кабелях. Разброс срабатывания ГИНов не превышал 100 нс. Выходное напряжение каждого ГИНа составляло ~ 0.6 МВ при токе одного генератора 60 кА, соответственно суммарный ток 12 ГИНов был равен 720 кА. Фронт импульса напряжения не превышал 0.2 мкс при длительности импульса на полувысоте ~ 0.5 мкс.

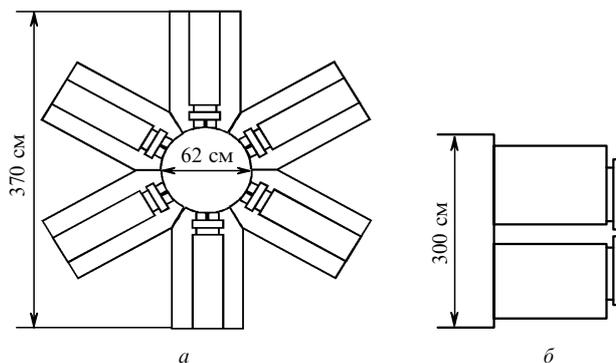


Рис.1. Конструкция установки: поперечное сечение шести ГИНов и лазерной камеры (а) и продольное двухэтажное расположение ГИНов (б).

С.П.Бугаев, Э.Н.Абдуллин, В.Б.Зорин, Б.М.Ковальчук, С.В.Логинов, Г.А.Месяц, В.С.Скакун, В.Ф.Тарасенко, В.С.Толкачев, П.М.Щанин. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 4; e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 6 апреля 2004 г.

Система разделительных фольговых окон представляла собой сложную конструкцию, состоящую из общей рамы, системы двенадцати опорных решеток и собственно фольги с механизмом крепления. В данной конструкции использовалась титановая фольга толщиной 40 мкм. Общая площадь фольгового окна составляла ~ 3 м², геометрическая прозрачность одной опорной решетки была равна $\sim 80\%$ при общей прозрачности $\sim 70\%$.

Диаметр активной области равнялся 60 см, ее длина – 200 см, активный объем составлял 600 л, полный объем – 980 л. Расстояние между двумя плоскими внутренними зеркалами равнялось 335 см. В качестве «глухого» зеркала использовалось зеркало с подложкой из стекла К8, на которую было нанесено алюминиевое покрытие. Выходным зеркалом служила плоскопараллельная кварцевая пластинка. Фотография лазера показана на рис.2, вывод лазерного излучения осуществлялся по вертикальной оси вниз.

Энергия электронного пучка, переданная в газ, определялась по возрастанию давления в лазерной камере при инжекции пучка. Импульс давления регистрировался датчиком на основе механотрона 6МДХ-3Б. Калибровка последнего проводилась с использованием образцового манометра при медленном изменении давления в лазерной камере. Полученная вложенная энергия соответствовала только энергии, расходуемой на нагрев газа. Часть энергии, ушедшей в виде излучения через выходное зеркало, а также затраченной на нагрев стенок и формирование акустических волн, не учитывалась. Однако эти потери, по нашим оценкам, не превышали $10\% - 20\%$.

Для определения энергии лазерного излучения и ее распределения по сечению выходного пучка была использована автоматизированная система измерений на основе калориметрических преобразователей ТПИ-2М.1, допускающих работу в диапазоне энергий $1 - 100$ Дж на один калориметр в спектральном интервале $0.2 - 20$ мкм. Рабочая площадь приемного элемента одного калориметра составляла 36 см². Для увеличения площади приемной поверхности одновременно использовалось до 31

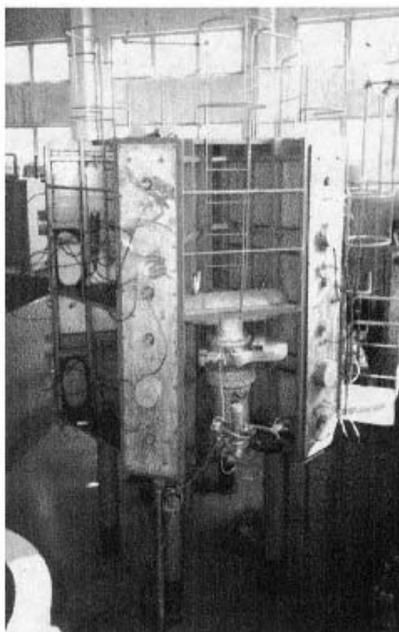


Рис.2. Широкоапертурный лазер с активным объемом 600 л и накачкой от 12 электронных пучков.

калориметра, которые были объединены в один блок. В каждом импульсе регистрировались энергия, поглощенная каждым калориметром, распределение энергии по калориметрам и энергия, поглощенная суммарной рабочей поверхностью блока калориметров. Поскольку калориметры ТПИ-2М.1 имеют ограничения по допустимой плотности и мощности излучения, проводилась их дополнительная калибровка с использованием приемников ИМО-2Н и ИКТ-1. Распределение энергии излучения по сечению выходного пучка лазера определялось также по автографу на фотобумаге, почернение которой при изменении плотности энергии излучения было практически линейным.

Для нахождения временных характеристик накачки применялись делители напряжения и пояса Роговского. Измерения проводились одновременно для всех 12 ГИНов. Регистрация импульсов лазерного излучения осуществлялась с помощью вакуумных фотодиодов ФЭК-22, сигналы с которых подавались на осциллографы С8-14.

Рабочие смеси, состоящие из аргона, ксенона и HCl, готовились непосредственно в лазерной камере, которая предварительно пассивировалась.

3. Моделирование работы ускорителя

Для определения оптимальных режимов работы ускорителя предварительно был создан его модуль на базе одного вакуумного ГИНа [9, 13]. Конструкция диода ускорителя приведена на рис.3. Здесь же даны траектории электронов и соответствующие им распределения плотности тока пучка на аноде при различных напряжениях на диоде, полученные в результате численных расчетов с помощью пакета программ Poisson-2 [14]. Межэлектродный промежуток вакуумного диода с гладким катодом использовался для получения пучка с поперечным сечением 25×100 см и энергией электронов $500 - 600$ кэВ. Ток пучка достигал 60 кА при длительности импульса по основанию $1.5 - 2.0$ мкс. Источником питания служил генератор Маркса с вакуумной изоляцией. Катод размещался на последней ступени генератора, проходной вакуумный изолятор в конструкции ускорителя отсутствовал. Эмиттирующая поверхность катода площадью 190×810 мм была изготовлена из углеграфитового войлока. Радиус кривизны опорной решетки выводного окна составлял 528 мм. Расстояние d между катодом и анодом в

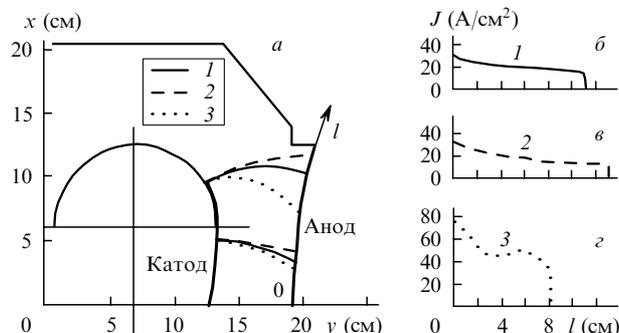


Рис.3. Конструкция вакуумного диода одного ГИНа (а), а также распределения плотности тока пучка на аноде при напряжениях на вакуумном диоде $U = 500$ (б) и 300 кВ (в) и в случае дополнительно созданной анодной плазмы при $U = 500$ кВ (г); кривыми 1–3 на рис.3,а обозначены соответствующие траектории движения электронов; l – координата вдоль поверхности анода (фольгового окна).

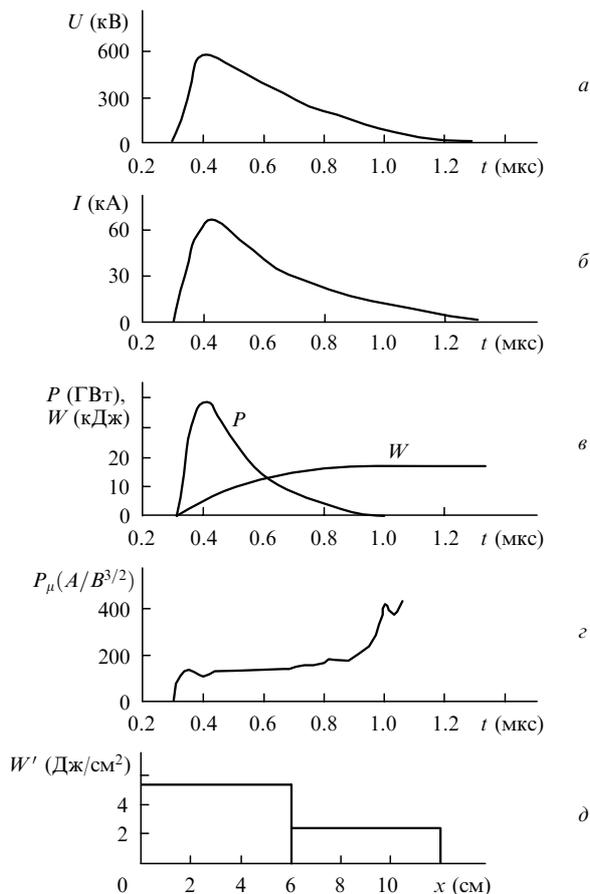


Рис.4. Осциллограммы импульсов напряжения на вакуумном диоде (а) и тока пучка (б) при зазоре между катодом и анодом 60 мм, а также зависимости мощности и энергии пучка (в) и первеанса диода (г) от времени; д – распределение плотности энергии в выведенном за анодную фольгу перпендикулярно продольной оси окна пучке электронов, полученное с помощью 48 calorimeters ТПИ-2М.1, установленных в два ряда вдоль фольгового окна.

плоскости симметрии диода равнялось 60–65 мм. Расчетные распределения плотности тока в направлении *l* вдоль поверхности анода в отсутствие анодной плазмы были достаточно равномерными.

Осциллограммы импульсов напряжения и тока в диоде, рассчитанные из них зависимости мощности и энергии электронного пучка, первеанса диода от времени, а также распределение энергии в выведенном за анодную фольгу электронном пучке, зарегистрированное в одном импульсе с помощью calorimeters ТПИ-2М.1 (48 шт.), приведены на рис.4. Видно, что осциллограммы напряжения и тока схожи, что свидетельствует об эффективной передаче мощности от генератора электронному пучку. Время установления первеанса, которое может быть сопоставлено с временем формирования эмиссионной границы плазмы, равно ~ 50 нс, при этом ток диода появляется практически одновременно с напряжением на межэлектродном зазоре. Первеанс диода слабо изменяется в течение импульса, что свидетельствует о постоянстве положения эмиссионной границы плазмы в межэлектродном зазоре в течение большей части импульса напряжения.

Имеются расхождения между расчетным распределением плотности тока пучка на аноде и экспериментально полученным распределением энергии пучка за анодной фольгой. Причиной расхождений может быть присутст-

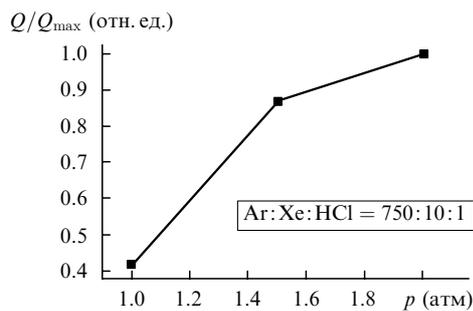


Рис.5. Зависимость относительной энергии излучения лазера от давления смеси Ar – Xe – HCl при зарядном напряжении $U_0 = 85$ кВ.

вие в межэлектродном зазоре объемного заряда ионов десорбированного с анода газа, не учитываемого при численных расчетах. Расчетное значение тока при напряжении на диоде 600 кВ и межэлектродном зазоре 60 мм равно 47 кА, что также меньше получаемого экспериментально. Полная энергия пучка в диоде составляет ~ 17 кДж, энергия за фольгой – около 10 кДж, при этом энергия, запасаемая в генераторе Маркса, равна ~ 22 кДж. Как мы уже отмечали, для накачки лазера использовалось 12 подобных ГИНов, причем имелась возможность включать одновременно любое их количество (от одного до 12) независимо от расположения.

4. Экспериментальные результаты исследований генерации и их обсуждение

В настоящей работе исследовалось влияние на характеристики генерации HCl-лазера давления рабочей смеси и ее состава, зарядного напряжения, числа включаемых ГИНов и зависимость энергии излучения от числа импульсов и времени работы на одной порции смеси. Снималось также распределение энергии излучения по сечению выходного пучка. Полученные данные приведены на рис.5–8.

При увеличении рабочего давления от 1 до 1.5 атм энергия излучения возрастает на 30 %, а от 1.5 до 2 атм – всего на 20 % (рис.5). Это обусловлено тем, что при зарядном напряжении $U_0 = 85$ кВ основная часть энергии электронного пучка вкладывается в рабочую смесь и противоположной стенке достигает относительно малая часть электронного пучка. Соответственно с ростом давления от 1.5 до 2 атм энерговклад в рабочую смесь меняется незначительно.

На рис.6 приведены зависимости энергии излучения от числа включаемых ГИНов для двух смесей с различ-

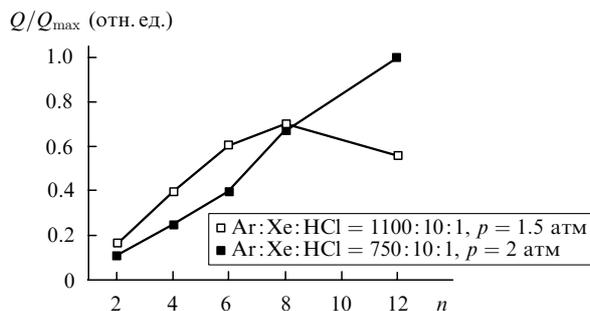


Рис.6. Зависимости относительной энергии излучения лазера от числа *n* включаемых ГИНов для разных газовых смесей и давлений при $U_0 = 85$ кВ.

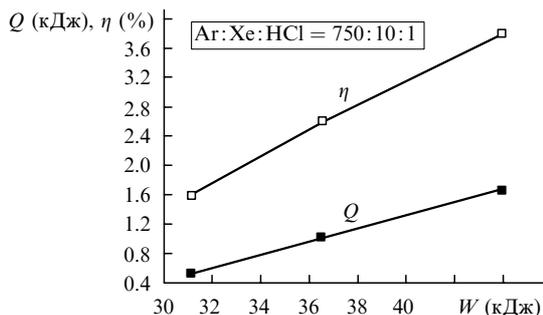


Рис.7. Зависимости энергии излучения лазера и КПД от вложенной в газ энергии, определенной по скачку давления, для смеси Ar–Xe–NeCl при $U_0 = 85$ кВ.

ным содержанием отдельных газов. При относительно малом содержании ксенона и NeCl увеличение мощности накачки, в данном случае за счет числа ГИНов, приводит к снижению энергии излучения, тогда как в смесях, оптимальных по содержанию отдельных газов, максимальные энергии излучения достигаются при наибольших мощностях накачки. При получении зависимости на рис.4 зарядное напряжение равнялось 85 кВ; для дальнейшего увеличения мощности накачки за счет зарядного напряжения следует использовать смеси с большим содержанием ксенона и NeCl.

Зависимость энергии излучения и КПД от вкладываемой энергии при $U_0 = 85$ кВ для смеси Ar:Xe:NeCl = 750:10:1 приведена на рис.7. Максимальная энергия излучения составила 1.6 кДж при КПД от вложенной в рабочую смесь энергии 3.8%. Длительность импульса излучения при этом составляла ~ 250 нс, а его запаздывание относительно начала импульса тока пучка было ~ 100 нс. С увеличением зарядного напряжения до 95 кВ в смеси Ar:Xe:NeCl = 750:25:1 при давлении 2 атм энергия излучения составила 1.9 кДж. Из-за небольшого клина между поверхностями выходной кварцевой пластинки распределение плотности энергии излучения в выходном пучке было различным в двух направлениях. Для оси, перпендикулярной клину, неоднородность в распределении плотности энергии излучения была менее 10%.

Максимальные энергии излучения реализуются в первых импульсах, после 3–5 включений ускорителя энергия излучения стабилизируется на уровне 80% энергии в первом импульсе, а затем длительное время не изменяется. Влияние числа импульсов лазера и времени работы на одной порции смеси после выхода на стационарный режим на энергию излучения в импульсе иллюстрирует рис.8. При работе на одной порции смеси в течение 146 ч различие в энергиях излучения 13-го и 41-го импульса составило всего $\sim 20\%$. В подобном лазере с активным объемом ~ 30 л [10] из-за увеличения соотношения между площадью внутренней поверхности лазерной камеры и ее объемом наблюдалась более быстрая деградация рабочей смеси. Эксперименты в настоящей работе и в [10] проводились с одинаковыми удельными энерговыкладами, смесями и давлениями при сохранении заданного соотношения между активным и общим объемами лазерной камеры.

Отметим, что доля лазерного ИК излучения на атомарных переходах Xe в оптимальном режиме для данного XeCl-лазера составляла менее 1% излучения на длине волны 308 нм. Даже в смеси Ar–Xe при получении только ИК генерации энергия излучения на атомарных пере-

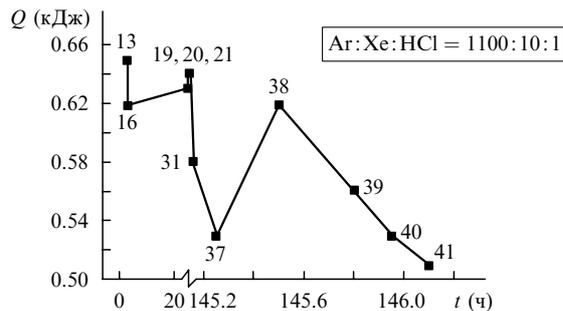


Рис.8. Зависимость энергии излучения в импульсе от числа импульсов и времени работы одной порции смеси Ar–Xe–NeCl при $U_0 = 85$ кВ, $p = 1.5$ атм. Цифры у точек – номер импульса.

ходах ксенона при мощности накачки ~ 100 кВт/см³ не превысила 10 Дж, а КПД генерации был менее 0.05% [12].

5. Заключение

Таким образом, исследования мощного широкоапертурного XeCl-лазера с активным объемом 600 л показали, что в смеси Ar:Xe:NeCl = 750:10:1 при давлении 2 атм и $U_0 = 85$ кВ на $\lambda \sim 308$ нм получена энергия излучения 1.6 кДж, а при $U_0 = 95$ кВ энергия излучения составила 1.9 кДж. В данном лазере за счет инжекции электронного пучка с шести сторон достигается однородное распределение энергии излучения по сечению выходного пучка, а большое соотношение между объемом лазерной камеры и площадью ее внутренней поверхности позволяет длительное время работать на одной порции рабочей смеси. Благодаря одноконтурной схеме генератора накачки исследуемый лазер отличается простотой конструкции и сравнительно малыми размерами.

Авторы благодарят за помощь в проведении данной работы Г.П.Белова, Л.Г.Винтизенко, С.И.Горбачева, В.М.Заславского, А.М.Ефремова, С.В.Иванова, В.Н.Киселева, Ю.С.Коренблита, В.Ф.Лосева, А.А.Новикова, Ю.В.Першина, А.В.Феденева, Е.А.Фомина, В.Т.Шкаптова.

1. Shaw M.J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3092**, 154 (1997).
2. Sethian J.D., Pawley C.J., Obenschain S.P., et al. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **25**, 221 (1997).
3. Owadano Y., Okuda I., Matsumoto Y., et al. *Fusion Engineering and Design*, **44**, 91 (1999).
4. Zvorykin V.D., Arlantsev S.V., Bakaev V.G., et al. *Laser and Particle Beams*, **19**, 609 (2001).
5. Ковальчук Б.М., Лосев В.Ф., Месяц Г.А., Тарасенко В.Ф. *Изв. вузов. Сер. Физика*, № 5, 12 (2000).
6. Rosocha L.A., Hanlon J.A., McLeod J., et al. *Fusion Technol.*, **11**, 576 (1987).
7. Абдуллин Э.Н., Гришин Д.М., Губанов В.П. и др. *Квантовая электроника*, **34**, 199 (2004).
8. Mesyats G.A., Bychkov Yu.I., Kovalchuk V.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1628**, 70 (1992).
9. Абдуллин Э.Н., Бугаев С.П., Ефремов А.М. и др. *ПТЭ*, № 5, 138 (1993).
10. Абдуллин Э.Н., Горбачев В.И., Ефремов А.М. и др. *Квантовая электроника*, **20**, 652 (1993).
11. Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F. *Pulsed Gas Lasers* (Washington: SPIE PRESS, 1995).
12. Ковальчук Б.М., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В. *Квантовая электроника*, **23**, 504 (1996).
13. Абдуллин Э.Н., Беломытцев С.Я., Бугаев С.П. и др. *Физика плазмы*, **17**, 741 (1991).
14. Астрелин В.Т., Иванов В.Я. *Автометрия*, № 3, 92 (1980).