

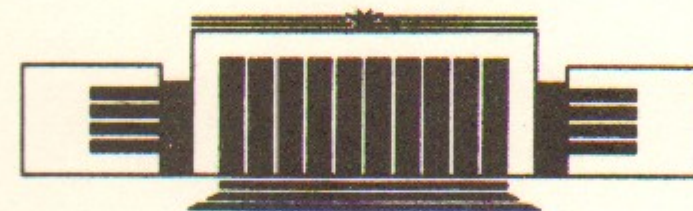


23  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

Н.А. Винокуров, И.Б. Дробязко, Г.Н. Кулипанов,  
В.Н. Литвиненко, И.В. Пинаев, В.М. Попик,  
И.Г. Сильвестров, А.Н. Скринский, А.С. Соколов

**ГЕНЕРАЦИЯ ВИДИМОГО И  
УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
В ОПТИЧЕСКОМ КЛИСТРОНЕ,  
УСТАНОВЛЕННОМ НА НАКОПИТЕЛЕ ВЭПП-3**

**ПРЕПРИНТ 89-118**



**НОВОСИБИРСК**



Генерация видимого и ультрафиолетового  
излучения в оптическом клистроне,  
установленном на накопителе ВЭПП-3

*Н.А. Винокуров, И.Б. Дробязко, Г.Н. Кулипанов,  
В.Н. Литвиненко, И.В. Пинаев, В.М. Попик,  
И.Г. Сильвестров, А.Н. Скринский, А.С. Соколов*

Институт ядерной физики  
630090, Новосибирск 90, СССР

АННОТАЦИЯ

Получена генерация излучения в широком спектральном диапазоне 2400—6900 Å (от видимого до ультрафиолетового) в оптическом клистроне ОК-4, установленном на накопителе ВЭПП-3. ОК-4 является первым лазером на свободных электронах, работающим в ультрафиолетовой области спектра.

1. ВВЕДЕНИЕ

Оптический клистрон (ОК) был предложен в 1977 г. Н.А. Винокуровым и А.Н. Скринским [1] как модификация лазера на свободных электронах (ЛСЭ). Он имеет более высокий коэффициент усиления, связанный с использованием специального элемента — группирователя, расположенного между двумя ондуляторами.

Эксперименты с ОК ведутся в нашем институте с 1979 г.

Первый вариант магнитной системы ОК-1 использовался для изучения спектра спонтанного излучения [2, 4] и измерений коэффициента усиления ОК [2, 5]. В двух последующих вариантах, ОК-2 [2, 6] и ОК-3 [7, 8], использовались гибридные (т. е. со стальными полюсами — концентраторами) ондуляторы на самарий — кобальтовых постоянных магнитах, которые позволили достичь коэффициента усиления более 2% на длине волны 6300 Å.

В конце 1985 г. было принято решение модернизировать ВЭПП-3, где одной из наиболее важных задач являлась установка дополнительного прямолинейного промежутка (байпасса), предназначенного для работы ОК. В марте 1988 г. байпасс был установлен на накопителе ВЭПП-3, в апреле был успешно накоплен электронный пучок и получено спонтанное излучение из ОК, в мае были установлены зеркала оптического резонатора и 3 июня была получена генерация в спектральном диапазоне от 5800 до 6900 Å с шириной линии менее 0,6 Å. В июле и октябре 1988 г. были также получены генерации в фиолетовой (3750—4600 Å) и ультрафиолетовой (2400—2700 Å) областях спектра.



## 2. БАЙПАСС НА НАКОПИТЕЛЕ ВЭПП-3

На рис. 1 приведена схема накопителя ВЭПП-3 с байпассом.

Байпасс состоит из двух поворотных магнитов (с максимальным полем 21 кГс), 12 квадруполь, вертикального вигглера и магнитной системы ОК длиной 7,8 м. Фокусирующая система байпасса является достаточно гибкой, что дает возможность оптимизировать параметры электронного пучка в ОК и согласовать  $\beta$ - и  $\eta$ -функцию в ОК с полукольцами ВЭПП-3 (см. рис. 2). Нулевая величина  $\eta$ -функции на прямолинейном участке байпасса обеспечивает независимость положения электронного пучка в ОК от частоты обращения и существенно упрощает процедуру синхронизации периодов обращения электронного и светового сгустков.

## 3. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ОК

Магнитная система ОК-4 состоит из двух электромагнитных ондуляторов с группирователем (трехполюсным вигглером) между ними. Параметры ондулятора приведены в табл. 1.

Таблица 1	
Длина ондулятора, м	3,4
Число периодов	33,5
Период, см	10
Магнитный зазор, см	2,2
Максимальная амплитуда магнитного поля на оси, кГс	5,3 (5,7)
Поперечная ширина полюса, см	9
Число отдельных шинопроводов	8
Сечение шины, мм <sup>2</sup>	18×18
Ток питания, кА	2,2 (3)
Мощность питания, кВт	60 (110)

Поле в ондуляторе возбуждается 8 периодически изогнутыми медными шинопроводами с отверстиями для водяного охлаждения. Шинопроводы скоммутированы на концах ондулятора.

Каждый ондулятор имеет 68 полюсов; крайние с обоих концов полюсы окружены одним витком и они имеют половинный магнитный потенциал. Ондуляторы установлены на байпассе друг за дру-

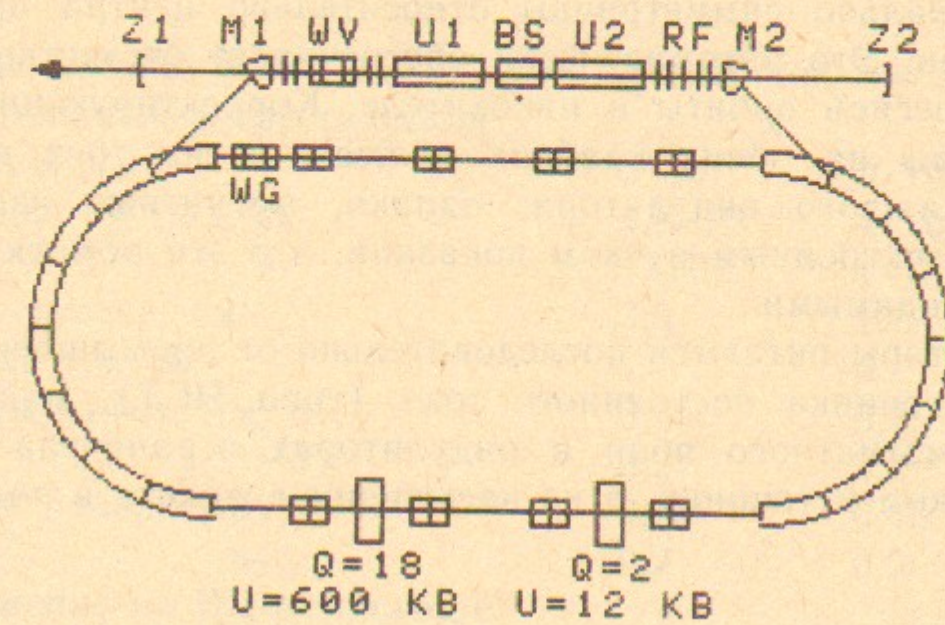


Рис. 1. Схема накопителя ВЭПП-3 с байпассом.

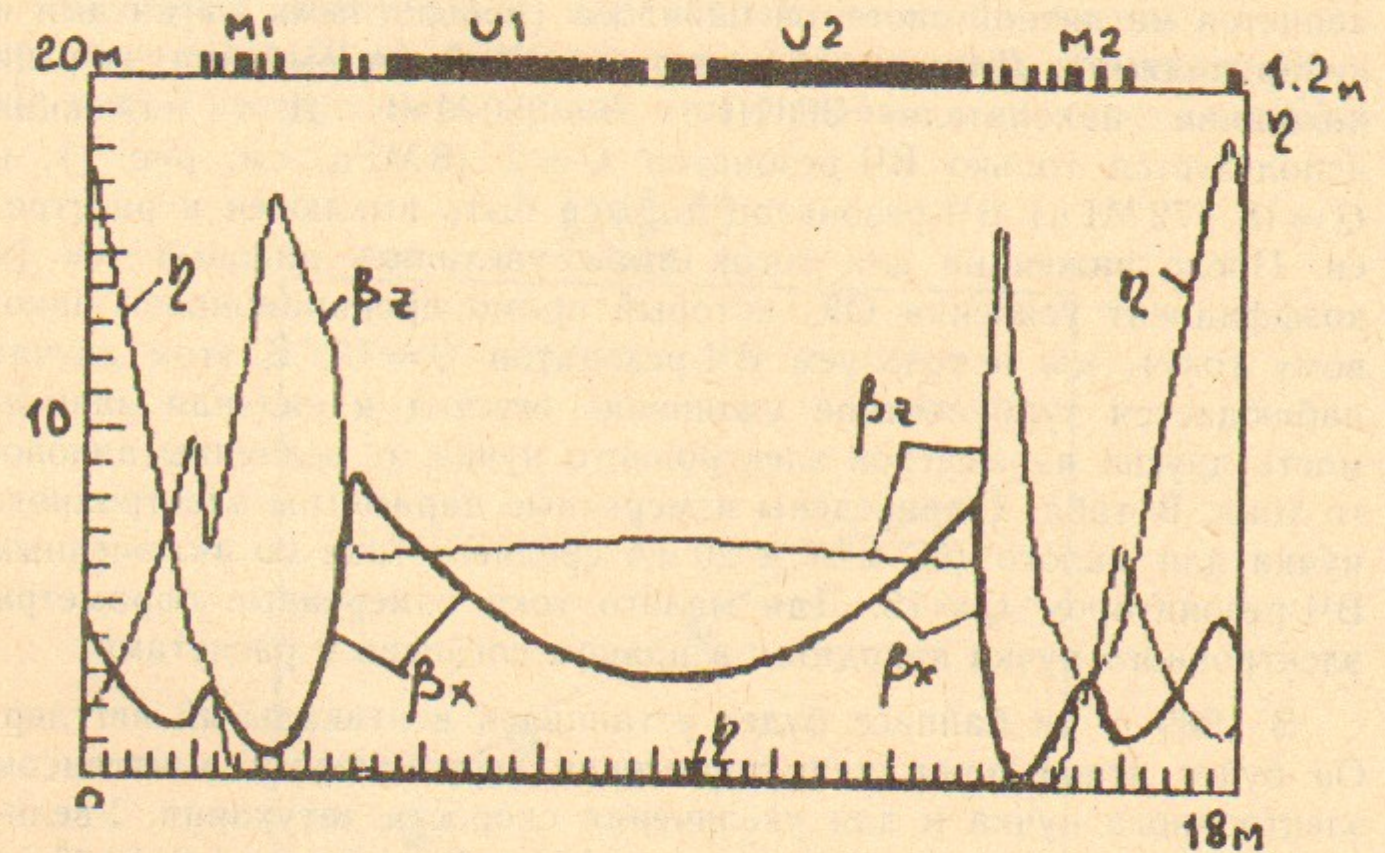


Рис. 2. Оптимизированные  $\beta$ - и  $\eta$ -функции в байпассе для работы ОК в ультрафиолетовой области спектра.



гом и зеркально симметричны относительно центра промежутка между ними. Это автоматически обеспечивает отсутствие искажения равновесной орбиты в накопителе. Корректирующие обмотки расположены на обоих крайних полюсах и на трех внутренних полюсах каждого ондулятора; однако, магнитные измерения и работа с электронным пучком показали, что эти обмотки не являются необходимыми.

Ондуляторы питаются последовательно от промышленного 2 кА, 100 кВт источника постоянного тока (типа ИСТ), максимальная величина магнитного поля в ондуляторах ограничена в первую очередь током источника, а не насыщением железа в полюсах (см. табл.1).

#### 4. ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Максимальная энергия электронов в байпасе (500 МэВ) определяется магнитной системой байпаса (поворотными магнитами и квадруполями). Для экспериментов с ОК была выбрана энергия инжекции накопителя ВЭПП-3  $E=350$  МэВ. Для инжекции используется только ВЧ-резонатор  $Q=2$  (8 МГц, см. рис. 1), и  $Q=18$  (72 МГц) ВЧ-резонатор должен быть выключен и расстроен. После инжекции для того, чтобы увеличить пиковый ток (и коэффициент усиления ОК, который прямо пропорционален пиковому току), мы используем ВЧ-резонатор  $Q=18$ . В этом случае наблюдается турбулентное удлинение сгустка и сильная зависимость других параметров электронного пучка от величины пикового тока. В табл. 2 приведены измеренные параметры электронного пучка для малого (0,1 мА) и 20 мА среднего тока со включенным ВЧ-резонатором  $Q=18$ . Для малого тока измеренные параметры электронного пучка находятся в полном согласии с расчетами.

В 1989 г. на байпас будет установлен вертикальный вигглер. Он будет использован для управления вертикальным эмиттансом электронного пучка и для увеличения скорости затухания. Увеличение вертикального эмиттанса до расчетной величины  $1,6 \cdot 10^{-6}$  см будет существенно ослаблять эффект Тушека и увеличит время жизни пучка. В этом случае ожидается значительное улучшение качества электронного пучка.

Таблица 2

Энергия $E=350$ МэВ	малый ток $I=20$ мА	
Относительный энергетический разброс	$3 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$
Эмиттанс, см·рад, $\epsilon_x$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$
$\epsilon_z$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Длина сгустка, см	3,3	10
Пиковый ток, А	—	6
Размеры пучка, мм, $\sigma_x$	0,35	0,45
$\sigma_z$	0,2	0,2
Угловой разброс, $\sigma_x'$	0,35	0,45
$\sigma_z'$	0,2	0,2
Напряжение на ВЧ-резонаторе 72 МГц, кВ	100	100

#### 5. КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ ОК

Согласно измеренным параметрам электронного пучка, для среднего тока 20 мА был рассчитан коэффициент усиления ОК-4. На рис. 3 приведены расчетная и измеренная зависимости коэффициента

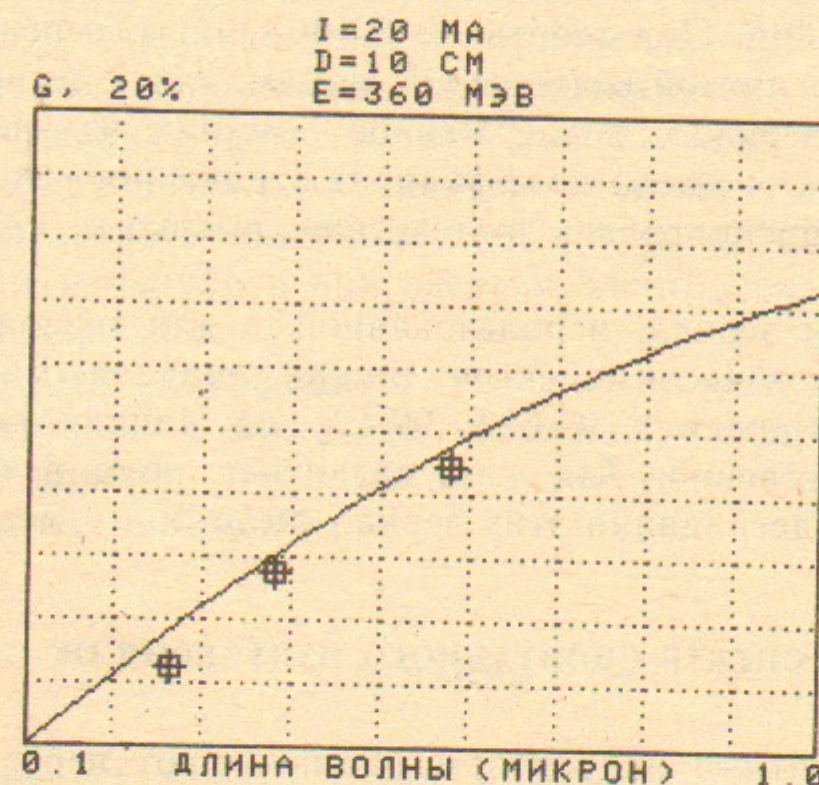


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления ОК-4 от длины волны (в мкм).



циента усиления от длины волны. Величина коэффициента усиления измерялась сравнением с потерями в оптическом резонаторе на краях полосы отражения зеркал, где генерация прекращалась: 10% на 6000 Å, 5,5% на 4000 Å и 2,5 на 2500 Å. Вследствие удлинения сгустка и роста энергетического разброса, начиная с пикового тока 3—4 А, коэффициент усиления практически переставал расти с ростом среднего тока.

## 6. ОПТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР

Оптический резонатор состоит из двух зеркал с радиусом кривизны 10 м, расположенных на расстоянии 18,7 м друг от друга. Это расстояние выбрано равным четверти периметра накопителя ВЭПП-3 для того, чтобы реализовать режим синхронизации в ОК (т. е. для того, чтобы световой сгусток в оптическом резонаторе взаимодействовал с электронным сгустком каждый раз, когда тот проходит через ОК). Зеркала равноудалены от центра магнитной системы ОК. Можно легко рассчитать оптическую  $\beta$ -функцию (2,5 м) в центре резонатора, где радиус основной моды составляет 0,9 мм, а на зеркалах 2,8 мм (для длины волны 6300 Å). Коэффициент отражения зеркал в начале работы был выше 99,9% на длине волны 6300 Å. Под действием ВУФ и мягкого рентгеновского излучения из магнитной системы ОК наблюдалась деградация зеркал. Переднее зеркало, подверженное прямому излучению, после трех недель работы имело коэффициент отражения только 98%, но генерация не прекратилась вследствие высокого коэффициента усиления ОК.

Другие пары зеркал, использовавшихся для генерации в фиолетовой и УФ области спектра, имели сначала максимальный коэффициент отражения 99,6 и 99,4% на длинах волн 4150 и 2500 Å, соответственно. Так как магнитное поле в ондуляторах было меньшим, деградация этих зеркал была более медленной.

## 7. СПЕКТР СПОНТАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОК

Электромагнитные ондуляторы обеспечивают перестройку длины волны основной гармоники излучения от 1000 до 15000 Å посредством изменения магнитного поля [10] (при фиксированной энергии электронов 350 МэВ), т. е. изменением величины  $K$ .

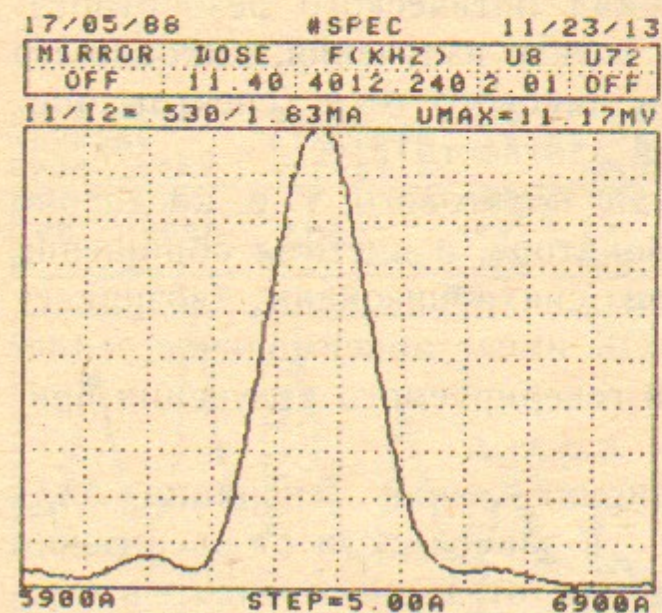


Рис. 4. Спектр спонтанного излучения из одного ондулятора.

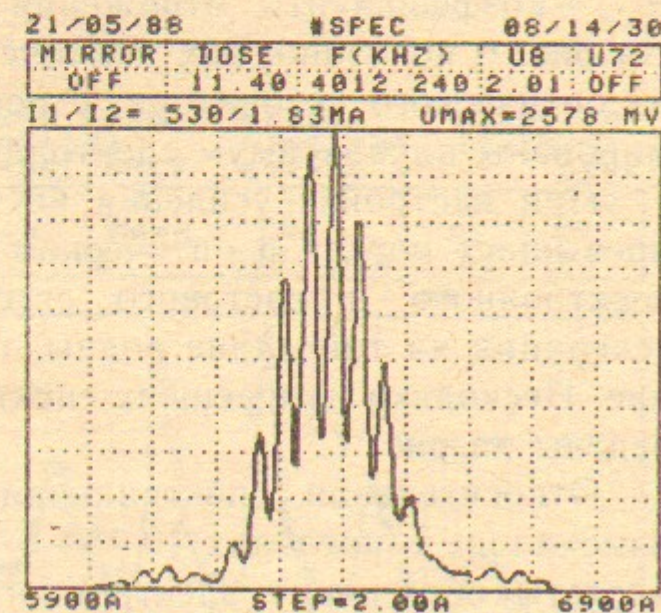


Рис. 5. Спектр спонтанного излучения ОК.

Спектр спонтанного излучения ОК является результатом интерференции волновых пакетов, излученных из двух ондуляторов и сдвинутых друг относительно друга в соответствии с задержкой электронов в группирующей секции. На рис. 4 приведен измеренный спектр спонтанного излучения (под нулевым углом) из одного ондулятора. Спектр спонтанного излучения ОК (т. е. из двух ондуляторов с включенным группирователем) изображен на рис. 5. Как можно видеть, полная спектральная ширина остается той же. Тонкая структура спектра спонтанного излучения ОК является результатом интерференции излучения из двух ондуляторов. Спектры измерялись при энергии электронов 350 МэВ и поле в ондуляторах 3,4 кГс.

Известно, что коэффициент усиления пропорционален производной спектральной плотности спонтанного излучения по длине волны. Это значит, что «тонкая структура» влечет увеличение коэффициента усиления ОК.

## 8. ГЕНЕРАЦИЯ В ОК

Вследствие различного знака коэффициента усиления ОК на левом и правом склонах спектра, наблюдалось изменение спектра излучения при усилении ОК ниже порогового ( $G_{OK} \leq 1 - R_1 R_2$ , где



$R_{1,2}$  — коэффициенты отражения зеркал оптического резонатора). На рис. 6 показано, как изменяется спектр излучения, выходящего из оптического резонатора, с ростом пикового тока (спектры нормированы на максимум спектральной плотности).

При настройке усиления ОК выше порогового, т. е. когда оно превышает потери в оптическом резонаторе, и частоты обращения электронного и светового сгустков синхронизованы, возникает генерация на той длине волны, где ОК имеет максимальное усиление. Несколько измеренных спектров генерируемого излучения приведены на рис. 7.

Относительная спектральная ширина линии генерации  $\Delta\lambda/\lambda$  изменялась в пределах  $10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-4}$  в зависимости от расстройки частоты обращения электронного пучка от точного синхронизма, тока пучка и других параметров.

Поперечное распределение интенсивности излучения соответствовало основной моде ( $TEM_{00}$ ) оптического резонатора. Когда мы работали в красной спектральной области, усиление ОК было достаточно велико, чтобы получить генерацию со смещением с оси оптического резонатора электронным пучком, для наблюдения генерации  $TEM_{10}$ -моды.

Непрерывная перестраиваемость длины волны генерации обеспечивалась изменением поля в ондуляторах. Ее границы (5800—6900, 3750—4000 и 2400—2700 Å) соответствуют полосам отражения использовавшихся зеркал. Пороговый ток генерации составлял от 1 до 10 мА в зависимости от состояния зеркал оптического резонатора.

Средняя мощность генерации ограничена ростом энергетического разброса в электронном пучке и пропорциональна полной мощности синхротронного излучения и максимально допустимому энергетическому разбросу. В нашем случае максимальный энергетический разброс ограничен снижением усиления до порогового и варьировался в пределах  $2 \div 6 \cdot 10^{-3}$ . Измеренная средняя мощность генерации (6 мВт на 6300 Å и 2,5 мВт на 2500 Å) при среднем токе 20 мА соответствовала ожидаемым величинам. Так как ограничена только средняя мощность генерации, мы реализовали режим работы оптического клистрона с G-модуляцией (модуляцией усиления) чтобы достичь высокой пиковой мощности. При помощи электростатических пластин электронный пучок сдвигался с оси оптического резонатора и периодически возвращался к своему исходному положению со временем возврата 2-3 мкс.

Когда мы возвращаем электронный пучок на ось оптического

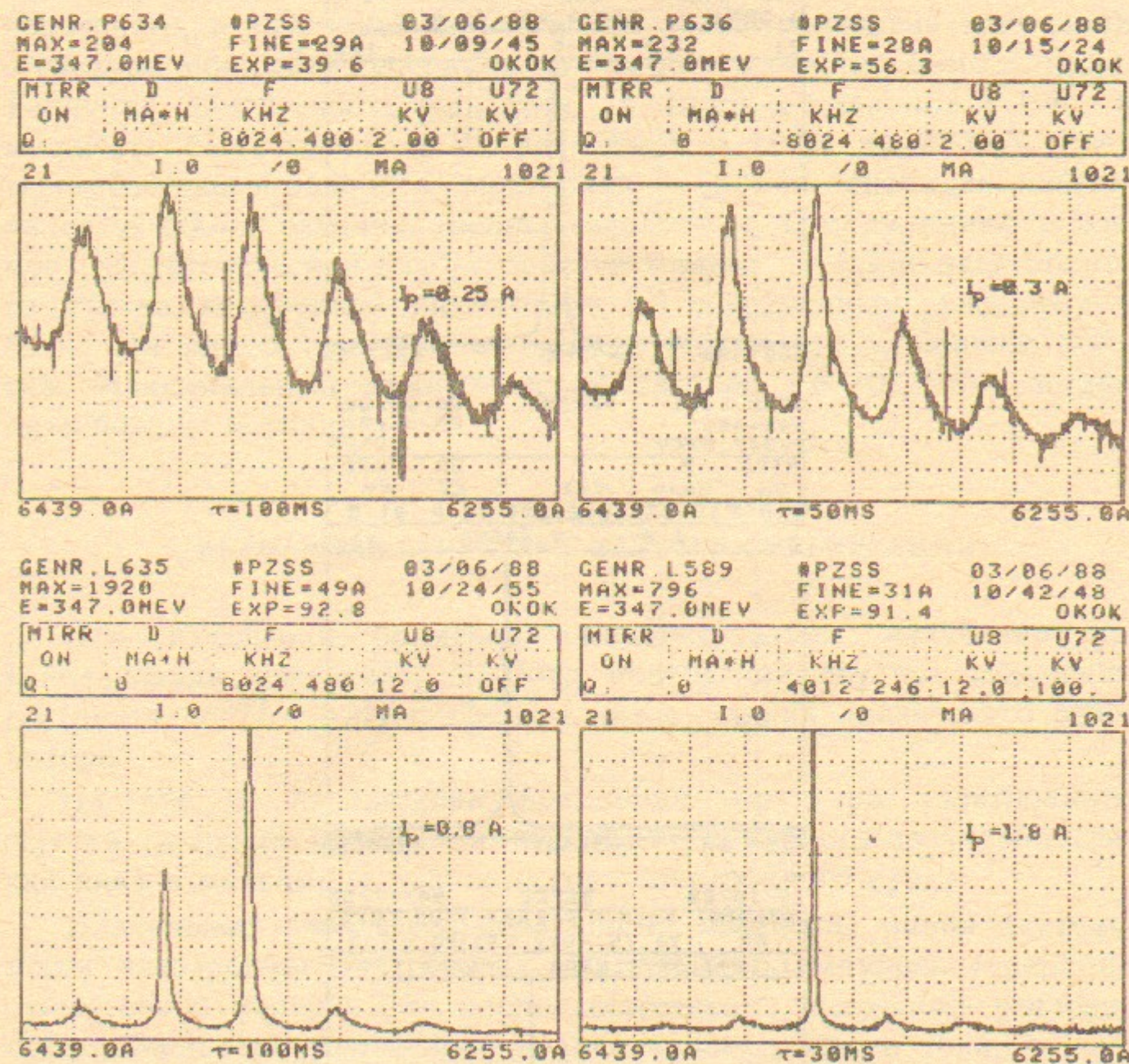


Рис. 6. Изменение спектра излучения, выходящего из оптического резонатора ОК, с ростом пикового тока.



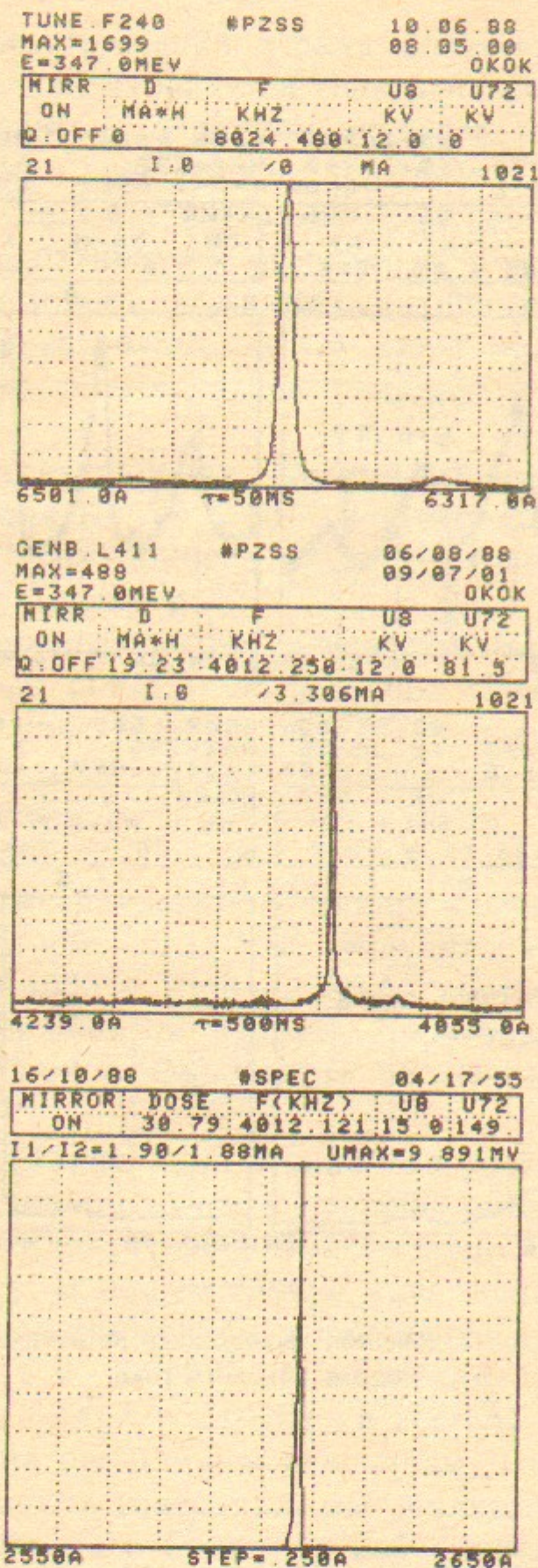


рис. 7. Линии генерации в красном, фиолетовом и ультрафиолетовом спектральных областях, полученные на ОК-4.

резонатора, усиление становится много больше, чем потери. Мощность излучения в оптическом резонаторе начинает быстро возрастать и увеличивается до тех пор, пока усиление остается выше порогового, а затем уменьшается. На рис. 8 приведена временная структура мощности генерации при работе в режиме  $G$ -модуляции. Типичная длительность импульса на 10 мА составляла 0,1 мс, а мощность была около 50 Вт на 6300 Å и 18 Вт на 2500 Å. Рост энергетического разброса электронов во время генерации наблюдался в обоих случаях (непрерывного и с  $G$ -модуляцией режимов). Энергетический разброс рассчитывался по длине электронного сгустка, измеренной диссектором [9] с временным разрешением 30 пс. На рис. 9 показано вызванное генерацией удлинение сгустка. Максимальный энергетический разброс  $1,5 \cdot 10^{-3}$  был в два раза больше исходного.

#### 9. ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ИЗЛУЧЕНИЯ ГЕНЕРАЦИИ

Для измерения временной микроструктуры излучения мы использовали диссектор. Частота повторений сгустка излучения составляет  $c/2L=8$  МГц, где  $L=18,7$  м — длина оптического резонатора.

На рис. 10 изображена временная структура электронного сгустка (широкое плато) и импульса генерируемого излучения (узкий пик) в максимуме пикового тока электронного пучка.

Длительность импульса спонтанного излучения равна длительности электронного сгустка, а длительность импульса генерации существенно меньше. Это вполне естественно, поскольку усиление пропорционально мгновенной величине электронного тока, и, следовательно, максимально в центре сгустка. После многих проходов, свет, взаимодействующий с центром электронного сгустка усиливается значительно сильнее, чем свет, взаимодействующий с краями. Длительность микроимпульса генерации была около 200 пс. В соответствии с этой длительностью пиковая мощность генерации составляет около 25 и 9 кВт на 6300 и 2500 Å, соответственно, в режиме модуляции усиления. Пиковая мощность внутри оптического резонатора была соответственно 2,5 и 1 МВт.

Временная структура мощности генерации, усредненная по периоду  $2L/c$  (микроструктура) приведена на рис. 11,а. Наблюдаемый процесс аналогичен релаксационным автоколебаниям (свет,



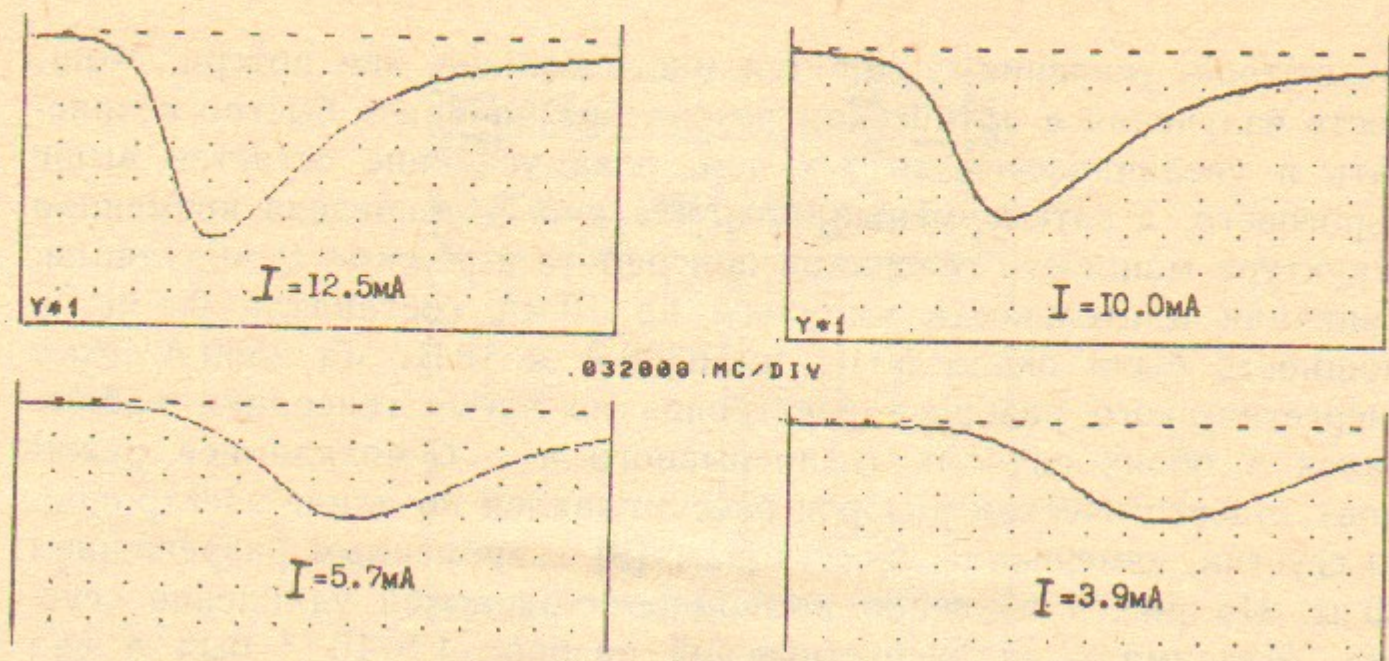


Рис. 8. Макроимпульсы мощности генерации в режиме модуляции усиления при различных токах пучка.

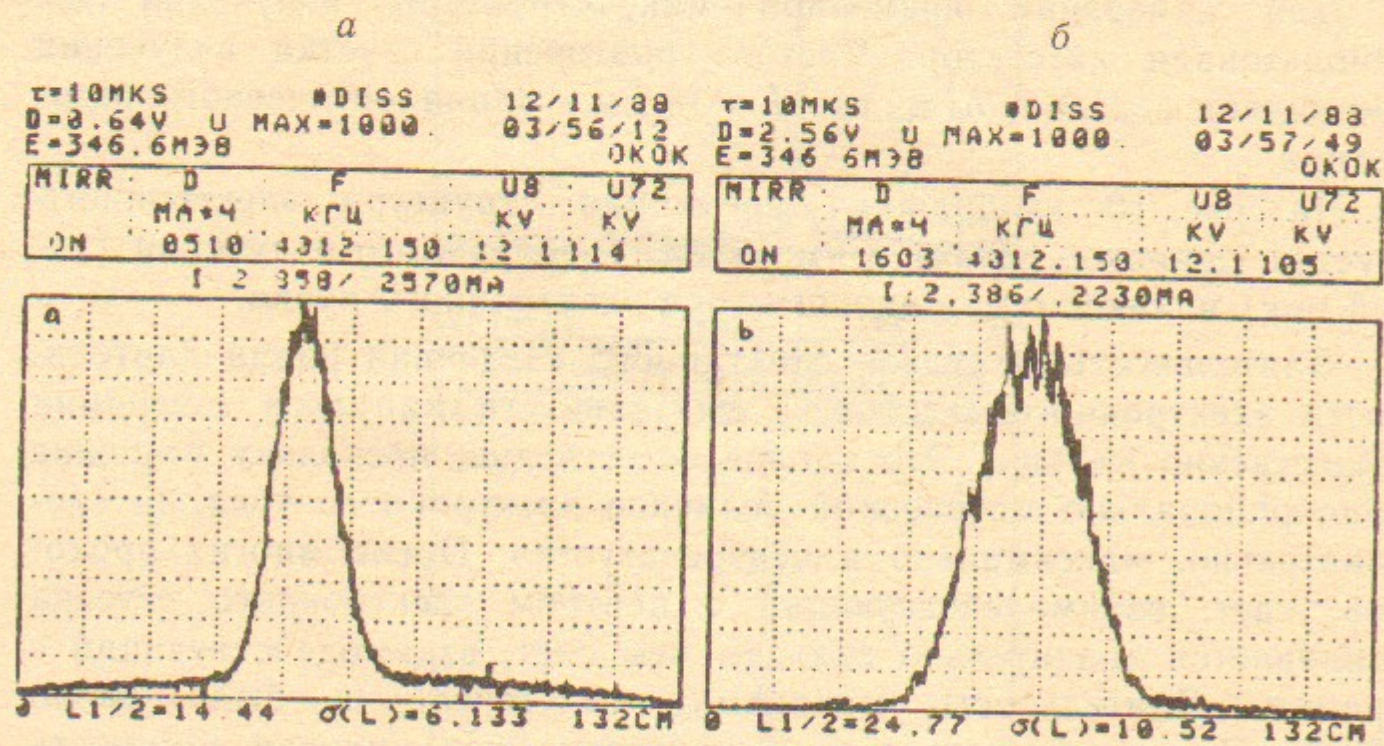


Рис. 9. Продольное распределение плотности электронного пучка (нормированное на максимум плотности):  
 а — в отсутствие генерации; б — во время генерации.

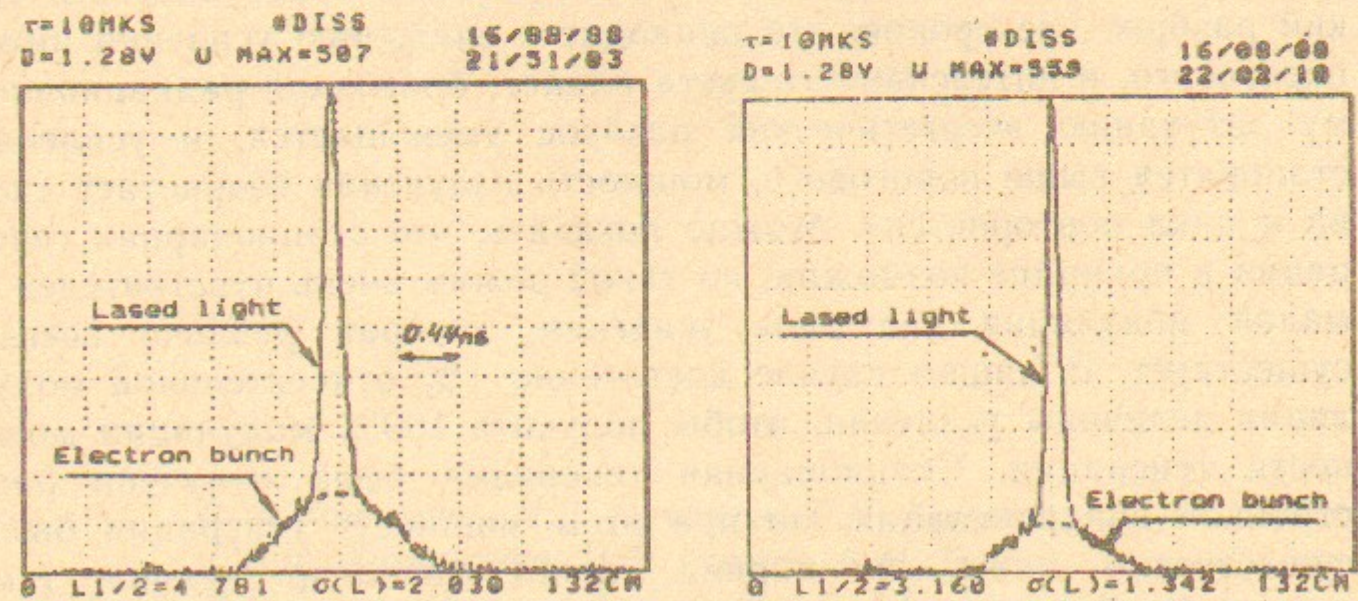


Рис. 10. Временная структура электронного сгустка (широкое плато) и микроимпульса генерации (узкий пик) в центре электронного сгустка.

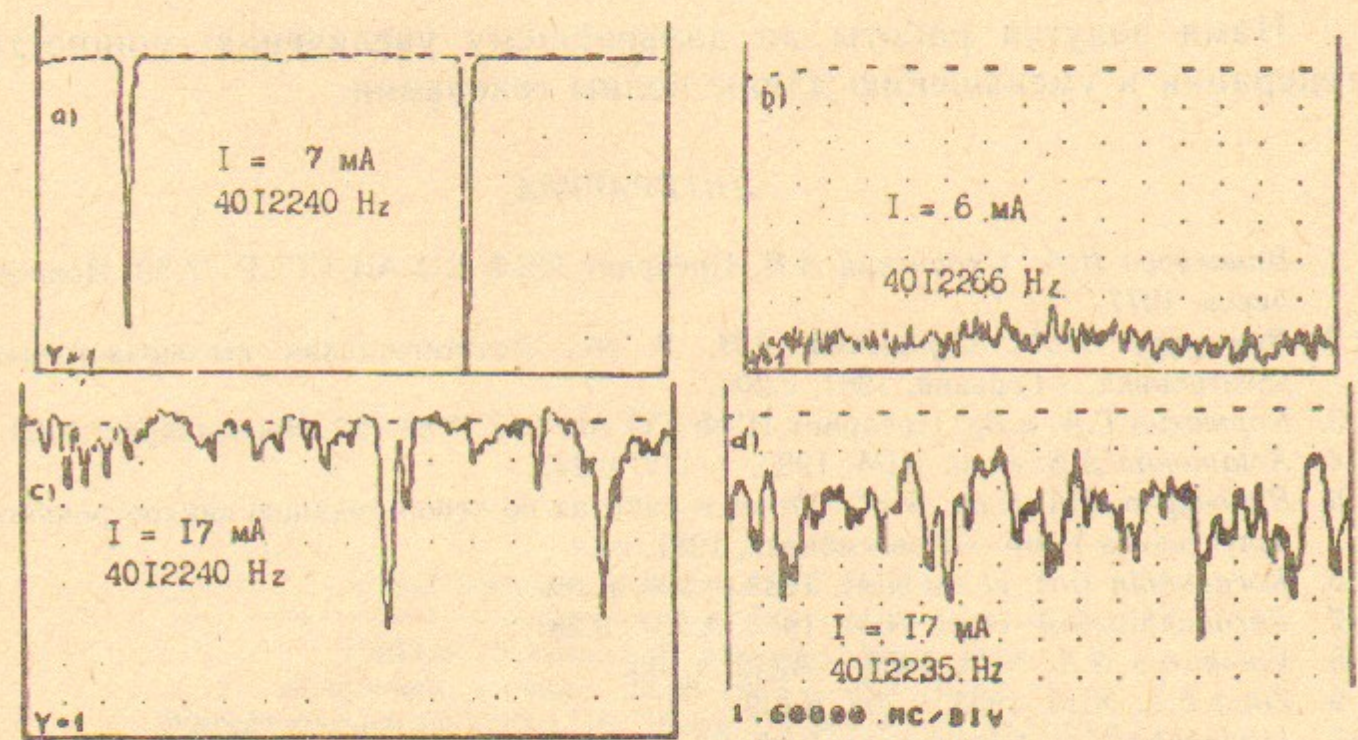


Рис. 11. Временная макроструктура мощности генерации при различных условиях.



взаимодействуя с электронным пучком, увеличивает энергетический разброс электронов, что приводит к снижению усиления ниже порогового, и интенсивность света падает; благодаря радиационному затуханию энергетический разброс уменьшается, и усиление становится выше порогового, мощность излучения возрастает снова и цикл повторяется). Можно показать, что стационарная генерация в принципе возможна, но такой режим очень чувствителен к малой модуляции величины усиления, которая реально всегда существует. В нашем случае достаточно 1% относительной модуляции величины усиления, чтобы получить 100% модуляции мощности генерации. Стационарная генерация была получена расстройкой синхронизации, но при этом мощность генерации была существенно ниже, и ширина линии довольно велика (см. рис. 11,б). В этом случае чувствительность к модуляции усиления значительно ниже.

#### 10. ПЛАНЫ

Нами ведутся работы по дальнейшему увеличению мощности генерации и уменьшению длины волны генерации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Винокуров Н.А., Скринский А.Н. Препринт ИЯФ СО АН СССР 77-59. Новосибирск, 1977.
2. Винокуров Н.А., Скринский А.Н. В сб.: Релятивистская высокочастотная электроника. — Горький, 1981, с.204.
3. Корнюхин Г.А. и др. Препринт ИЯФ СО АН СССР 83-137. Новосибирск, 1983.
4. Artamonov A.S. et al. NIM, 1980, v. 177, p.247.
5. Винокуров Н.А. и др. В сб.: Отчет о работах по использованию синхротронного излучения в ИЯФ. — Новосибирск, 1981, с.12.
6. Korniyukhin G.A. et al. NIM, 1983, v.208, p.189.
7. Korniyukhin G.A. et al. NIM, 1985, A.237, p.281.
8. Vinokurov N.A. NIM, 1986, v.A246, p.105.
9. Zinin E.L. NIM, 1983, v.208, p.439.
10. Litvinenko V.N. Synchrotron Radiation News, 1988, v.1, N5, p.18.

Н.А. Винокуров, И.Б. Дробязко, Г.Н. Кулипанов,  
В.Н. Литвиненко, И.В. Пинаев, В.М. Попик,  
И.Г. Сильвестров, А.Н. Скринский, А.С. Соколов

Генерация видимого и ультрафиолетового  
излучения в оптическом клистроне,  
установленном на накопителе ВЭПП-3

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 21 августа 1989 г.  
Подписано в печать 28.08 1989 г. МН 10353  
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,4 печ.л., 1,1 уч.-изд.л.  
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 118

Набрано в автоматизированной системе на базе фото-  
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и  
отпечатано на ротапинтере Института ядерной физики  
СО АН СССР,  
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.