

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ АПОДИЗИРУЮЩИХ ДИАФРАГМ С ВЫСОКОЙ ЛУЧЕВОЙ ПРОЧНОСТЬЮ

Ю. В. Миронов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Для решения многих практических задач нелинейной оптики, голографии, лазерных технологий необходимо формирование заданного пространственного профиля лазерного излучения. Одним из известных методов коррекции лазерного излучения является внесение в пучок элементов с радиально-зависимыми оптическими характеристиками. Такими элементами, например, являются так называемые мягкие, или аподизирующие диафрагмы (АД).

Аподизация лазерного пучка представляет собой процесс формирования плавно спадающего на краях апертуры пучка профиля интенсивности, посредством которого снижаются дифракционные эффекты, возникающие на краях апертуры лазерных систем. А именно дифракционные эффекты Френеля ответственны за самофокусировку пучка, которая обуславливает разрушение лазерной оптики.

На сегодняшний день предложен и реализован ряд способов формирования АД разных типов. Исследования в этой области актуальны и сегодня, поскольку многие АД не удовлетворяют всем требованиям к таким элементам. В связи с этим создаются новые и совершенствуются существующие технологии изготовления АД.

Требования, предъявляемые к АД:

- наличие пространственного профиля пропускания, близкого к П-образному (одним из таких является супергауссов профиль);
- превышение лучевой стойкости АД над интенсивностью канализуемого излучения;
- обеспечение с помощью разрабатываемой технологии изготовления АД с практически оправданным рабочим ресурсом.

К настоящему времени одним из наиболее эффективных методов аподизации является метод, основанный на пропускании пучка через систему зубчатая диафрагма – пространственный фильтр. Система аподизации с применением зубчатой диафрагмы сравнительно проста в изготовлении, позволяет работать с пучками в широком диапазоне длин волн, высокой плотностью энергии и различной формой апертуры. Аподизация пучка зубчатыми диафрагмами, предложенная в конце 1970-х годов, в настоящее время широко применяется в крупнейших установках для лазерного термоядерного синтеза.

Задача – разработка технологии изготовления зубчатой диафрагмы размером 12×12 мм для мощной

лазерной физической установки с энергией излучения на входе главного усилительного тракта до 0,5 Дж.

Оптическая схема системы аподизации пучка с применением зубчатых диафрагм представлена на рис. 1.

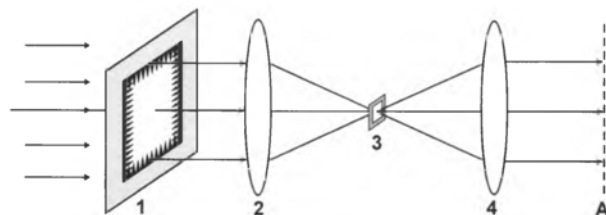


Рис. 1. Оптическая схема аподизации пучка зубчатой диафрагмой: 1 – апертурная зубчатая диафрагма; 2, 4 – линзы телескопа; 3 – селектирующая диафрагма; А – плоскость перестроения изображения зубчатой диафрагмы

Цель работы – разработка технологии изготовления зубчатых аподизирующих диафрагм из прозрачного диэлектрика, позволяющих формировать пучки с плотностью энергии $>1 \text{ Дж/см}^2$ в наносекундном диапазоне длительностей импульса, при этом технология изготовления диафрагм должна позволять воспроизводить форму зубцов с неточностью менее 10 мкм.

В работе предложена и отработана технология изготовления зубчатых диафрагм методом лазерной резки поверхности и объема подложки из стекла К8 без просветляющего покрытия, с нанесенными односторонним и двусторонним просветляющими покрытиями.

С точки зрения технологии лазерной обработки наличие или отсутствие просветляющих покрытий не сказывается на выборе параметров режима лазерной резки, и эти особенности мы опускаем для упрощения описания хода работ. При отработке технологии изготовления диафрагм в качестве материала для диафрагмы кроме стекла К8 использовали подложку из кварцевого стекла. Кристаллический кварц, как материал подложки для изготовления зубчатых диафрагм, уступает стеклу К8 по большинству критериев. Единственное отмеченное преимущество – меньший, по сравнению со стеклом, коэффициент поглощения излучения. Ход работ по лазерной обработке кварцевого стекла из настоящего доклада исключили.

По разработанным технологиям изготовлены диафрагмы методом лазерной резки поверхности и объема подложки из стекла К8.

По схеме, рис. 1, проведена регистрация пучков в плоскости перестроения изображения зубчатых диафрагм размером 12×12 мм, изготовленных методом лазерной резки объема и поверхности подложки из стекла К8.

Исследован пространственный профиль пучка в плоскости перестроения изображении зубчатой диафрагмы. По результатам исследований сделан вывод о возможности применения каждой из рассмотренных диафрагм в протяженном тракте мощных лазерных систем.

С применением специальной экспресс-методики определена лучевая прочность изготовленных диафрагм. Исследовано формирование пространственного профиля пучка в системе аподизации на основе разработанных и изготовленных диафрагм. Данные исследования не являлись целью наших работ и выполнены постановщиком задачи изготовления диафрагм. Результаты применения изготовленных диафрагм будут приведены ниже.

Методы изготовления зубчатых диафрагм

Распространенными методами изготовления зубчатых диафрагм являются лазерная резка металлической фольги и фотолитографический метод, основанный на травлении тонкой металлической пленки на поверхности прозрачной подложки.

Метод лазерной резки металлической фольги позволяет изготавливать диафрагмы с высокой лучевой прочностью и только диафрагмы с формой зубцов близкой к треугольной. Однако профиль пучка на выходе из диафрагмы должен соответствовать функции супергаусса, формировать который с помощью зубчатых диафрагм с треугольной формой зубцов невозможно.

Преимущество фотолитографического метода - высокая точность изготовления формы зубцов. Существенный недостаток фотолитографического метода - низкая, как правило <100 мДж/см², лучевая прочность изготавливаемых диафрагм, что ограничивает плотность энергии излучения на выходе системы аподизации.

Известно, что прозрачные диэлектрики, например стекло К8, обладают лучевой прочностью 26–31 Дж/см² при длительностях лазерного импульса 3–4 нс, что более чем на два порядка превышает лучевую прочность тонкопленочных металлических покрытий, применяемых для изготовления зубчатых диафрагм фотолитографическим способом. В отличие от металлических пленок, поверхностные и объемные разрушения прозрачного диэлектрика, формируемые в процессе лазерной резки подложки, представляют собой локальные области сильно разупорядоченной структуры материала самого диэлектрика (трещины, проплавы, помутнения и др.), которые, помимо поглощения, приводят к сильному рассеиванию проходящего через них излучения. Данное свойство позволяет избежать их чрезмерного нагрева

и испарения, а также последующего разрушения прилегающих областей диэлектрика.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований по разработке технологии изготовления зубчатых диафрагм, позволяющей, по сравнению с фотолитографическим способом, значительно повысить лучевую прочность изготавливаемых диафрагм при неточности изготовления зубцов на уровне <10 мкм.

Технология изготовления зубчатых диафрагм на подложке из стекла К8

Отработка технологии изготовления зубчатых диафрагм проводилась с применением импульсно-периодического лазера с длиной волны $\lambda = 1064$ нм.

Лазерные импульсы пикосекундной длительности позволяют проводить обработку материалов методом холодной абляции. Это значит, что концентрация энергии, достаточной для испарения обрабатываемого материала, происходит в определенной точке на очень короткое время воздействия импульса (в нашем случае - 10–20 пс), за которое материал в этой точке испаряется, а вокруг точки не успевает подвергнуться тепловому влиянию. Это обеспечивает новое качество обработанной поверхности, поскольку позволяет исключить побочные тепловые эффекты, приводящие к микротрещинам и образованию дефектов. Такой лазер подходит для высококачественной микрообработки практически любых материалов с микронной точностью.

Проведены исследования по лазерной обработке поверхности и объема подложки из стекла К8 при различных параметрах режима обработки (частоты следования импульсов, мощности излучения, скорости движения подложки относительно режущего луча). Цель исследований - достичь минимальной ширины линии реза подложки, на основании которой можно сделать вывод о точности воспроизведения заданной формы зубцов с применением данного лазера, а также определить размер, форму и минимальное количество линий реза, необходимых для формирования отдельного зубца диафрагмы с требуемой точностью.

В результате предварительных исследований с применением пикосекундного лазера показана возможность формирования линий реза подложки из стекла К8 шириной ≈ 10 мкм на поверхности и ≈ 8 мкм в объеме подложки.

По результатам отработки технологии резки и в зависимости от требуемой формы зубца были определены размеры и минимальное количество линий реза для формирования зубцов, позволяющих в системе аподизации сформировать пространственный профиль пучка, описываемый функцией супергаусса.

Зубчатая диафрагма с аналогичной формой зубцов воспроизведена фотолитографическим способом и показала возможность формирования пучка с расчетным коэффициентом заполнения 87 % и модуляцией

интенсивности излучения менее 1 %. Фотография зубчатого края диафрагмы представлена на рис. 2. Высота зубцов – 1,15 мм, период повторения зубцов – 0,19 мм.

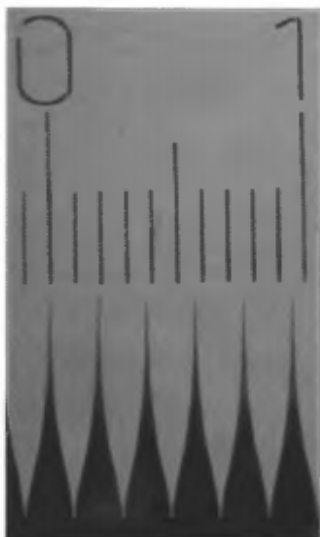


Рис.2. Фотография зубчатого края диафрагмы, изготовленной фотолитографическим способом (цена деления 0,1 мм)

На рис. 2 видно, что огибающая линия зубца представляет собой сложную функцию. Кроме того, можно заметить, что вершина зубца содержит протяженный участок малой ширины (менее 10 мкм), из-за обгорания и деформации которого не удалось изготовить зубчатую диафрагму методом лазерной резки металлической фольги.

Воспроизведение формы зубцов, представленной на рис. 2, посредством метода лазерной резки подложки выполняли в следующей последовательности, рис. 3:

1 этап – от основания формируемого зубца методом лазерной резки проводили несколько, частично перекрывающихся друг друга, параллельных прямых линий, заканчивающихся на внешней части зубца (рис. 3,а);

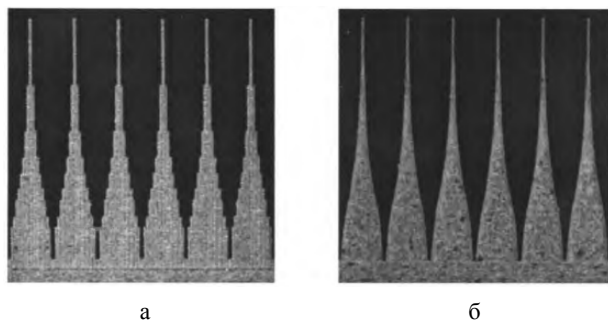


Рис. 3. Фотографии последовательного формирования зубчатого края диафрагмы в процессе изготовления методом лазерной резки поверхности подложки из стекла К8: а – 1 этап; б – 2 этап

2 этап – проводили общую огибающую линию, проходящую через внешние окончания параллель-

ных линий (рис. 3,б). Неточность позиционирования рабочего стола лазерной установки – 3 мкм. Этого вполне достаточно для воспроизведения заданной формы зубцов.

Сравнение показало, что формы зубцов рис. 2 и 3,б практически совпадают, что подтвердило возможность достижения требуемой точности изготовления зубчатых диафрагм методом лазерной резки поверхности подложки из стекла К8.

Аналогично формировались зубцы в объеме подложки. При этом режущий луч фокусировался на глубине 2–3 мм от поверхности подложки. Отмечено, что зубцы в объеме визуально обладают большей прозрачностью по сравнению с зубцами на поверхности подложки. В связи с этим предложено в одной подложке формировать несколько зубчатых диафрагм расположенных точно друг под другом на разной глубине, т. е. в виде нескольких (до трех) слоев. Фотография зубцов, изготовленных в объеме подложки из стекла К8, представлена на рис. 4.

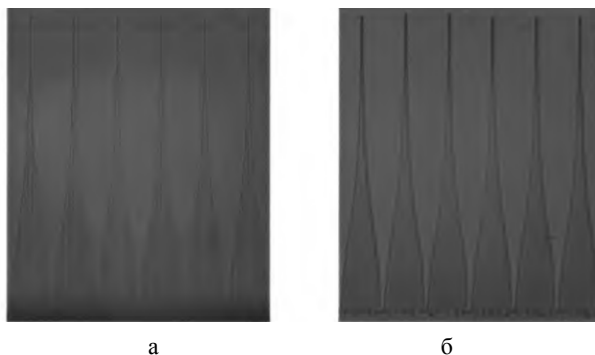


Рис. 4. Фотография зубцов в объеме подложки из стекла К8: а – однослойные зубцы; б – трехслойные зубцы

На рис. 4 видно, что прозрачность зубцов с трехслойным расположением меньше, чем с расположением в один слой. Анализ показал также хорошее совпадение форм зубцов, изготовленных методом лазерной резки объема подложки и фотолитографическим способом.

Аналогичные работы выполнены на подложке из кварцевого стекла.

Изготовлены зубчатые диафрагмы квадратной апертуры размером 12×12 мм, высотой зубцов 1,2 мм и периодом зубчатой структуры – 0,19 мм.

На рис. 5 представлены диафрагма и части зубчатого края диафрагмы, изготовленной методом резки поверхности подложки из стекла К8 толщиной 8 мм. Регистрация проведена оптическим (рис. 5,а, б, в) и электронным (рис. 5,г, д, е) микроскопами.

Зарегистрированный электронным микроскопом участок на вершине зубца, на рис. 5е, подтверждает, что ширина линии реза поверхности подложки из стекла К8 составляет ≈ 10 -12 мкм. С применением поверхностной резки подложки вдоль основания зубцов проведена совокупность линий, параллельных сторонам квадрата диафрагмы, образуя сплошной участок шириной 2 мм. Данным способом сформирована квадратная апертура диафрагмы.

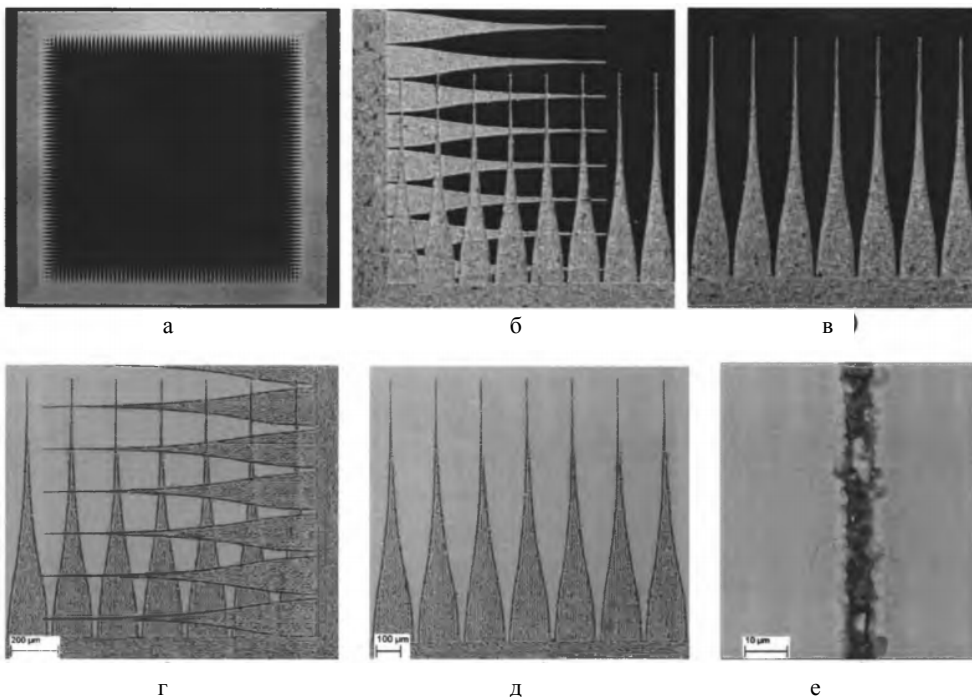


Рис.5. Элементы зубчатой структуры диафрагмы, изготовленной методом лазерной резки поверхности подложки из стекла К8: а, б, в – зарегистрированные оптическим микроскопом; г, д, е – зарегистрированные электронным микроскопом

Выводы

В результате проведенных исследований показана возможность формирования минимальной ширины линии реза объема и поверхности подложки из стекла К8 шириной 8–10 и 10–12 мкм соответственно.

Изготовлены и исследованы зубчатые диафрагмы, формирующие аподизированные пучки с плотностью энергии до 22 Дж/см^2 в наносекундном диапазоне длительностей лазерного импульса.

Установлено:

- зубчатая диафрагма, изготовленная методом однослойной лазерной резки объема подложки из стекла К8, не позволяет качественно проводить аподизацию пучка ввиду высокого уровня пропускания излучения зубцами и последующим формированием резкого перепада интенсивности на краях апертуры пучка;

- зубчатая диафрагма, изготовленная методом трехслойной лазерной резки объема подложки из стекла К8, показала возможность аподизации лазерного пучка. С целью уменьшения пропускания излучения зубцами рекомендовано рассмотреть возможность формирования большего числа слоев зубчатых диафрагм в объеме подложки;

- зубчатые диафрагмы, изготовленные методом лазерной резки поверхности подложки из стекла К8 с односторонним и двухсторонним просветляющим покрытием, показали возможность формирования аподизированного пучка без модуляции интенсивности. Ввиду меньших потерь излучения предпочтение следует отдать диафрагмам с двухсторонним просветлением.

Оптимизация системы аподизации лазерного пучка мощной лазерной установки

Система аподизации лазерного пучка на основе зубчатой диафрагмы применяется в тракте системы формирования опорного излучения (СФОИ) мощных лазерных установок уже давно. Оптическая схема системы аподизации пучка в СФОИ в подобных установках представлена на рис. 6.

Система выполнена на базе оконечного пространственного фильтра СФОИ, который перестраивает изображение зубчатой диафрагмы на вход главного усилительного тракта, где сформированный пучок делится на четыре канала. Зубчатая диафрагма изготовлена вручную из латунной сетки, с одного края которой удалены поперечные проволоки (период сетки 0,3 мм, толщина проволоки 0,1 мм). Четыре изготовленные таким образом заготовки закреплены на квадратной диафрагме размером $12 \times 12 \text{ мм}$. Длина зубцов – 1 мм. Фотография зубчатой диафрагмы с увеличенной частью зубчатого края представлена на рис. 7.

Расчеты показали, что коэффициент заполнения пучка, сформированного диафрагмой с прямоугольной формой зубцов, составляет $K_{\text{зап}} \approx 70 \%$. При этом минимальная величина превышения уровня пиковой плотности энергии относительно средней $\approx 1,6 \%$

Как отмечалось ранее, изготовленные фотолитографическим методом зубчатые диафрагмы позволяют формировать пучок с гаусоподобным профилем излучения, с коэффициентом заполнения до $K_{\text{зап}} \approx 87\%$ и превышением пиковой плотности энергии относительно средней менее 1 %. Но эксперимен-

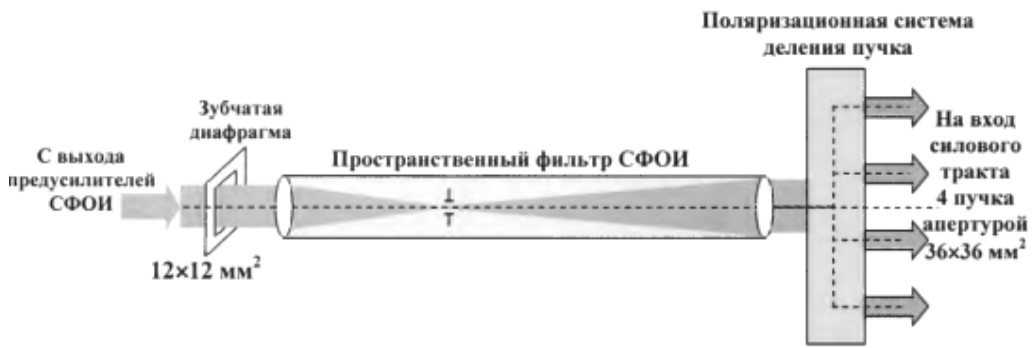


Рис. 6. Стандартная система аподизации пучка в тракте СФОИ лазерной установки

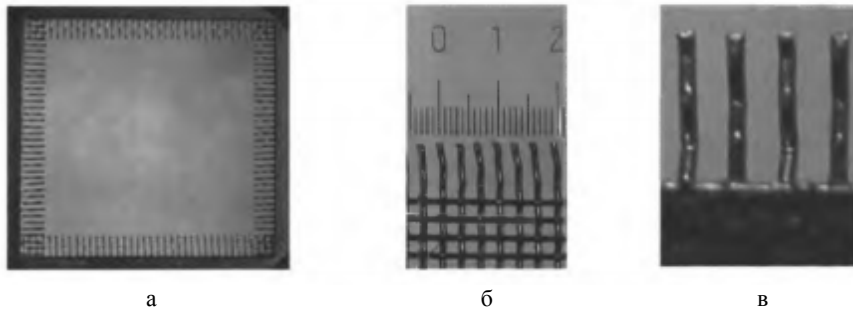


Рис. 7. Фотографии: а – зубчатой диафрагмы с увеличенной частью зубчатого края; б – фрагмент увеличенной части зубчатого края (цена деления 0,1 мм); в – увеличенный фрагмент увеличенной части зубчатого края

тальная реализация подобных диафрагм фотолитографическим способом не позволила применить их в тракте СФОИ мощной установки ввиду низкой лучевой прочности. По оценкам плотность энергии пучков на входе системы аподизации в тракте установки может достигать 1 Дж/см^2 , что более чем в 10 раз превышает предельную лучевую прочность фотолитографической зубчатой диафрагмы.

С целью повышения коэффициента заполнения пучков на входе главного усилительного тракта установки провели модернизацию системы аподизации пучка. Новая зубчатая диафрагма изготовлена методом лазерной резки поверхности подложки из стекла К8, просветленной с двух сторон.

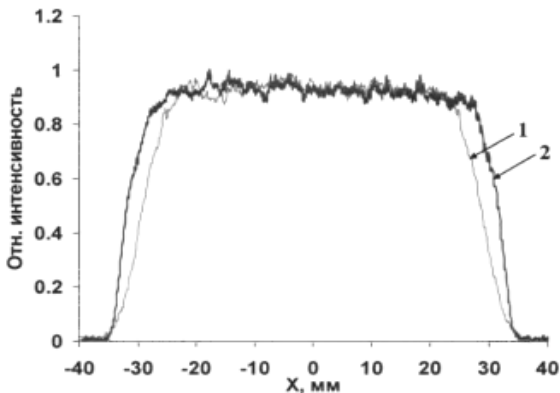


Рис. 8. Сравнение профилей интенсивности пучков на входе главного усилительного тракта установки: 1 – до модернизации системы аподизации; 2 – после модернизации системы аподизации

Сравнение пространственных профилей пучков представлено на рис. 8. Анализ показал, что проведенная модернизация позволила увеличить коэффициент заполнения пучка с $K_{\text{зап}} \approx 70 \%$ до $K_{\text{зап}} \approx 85 \%$.

Литература

1. Вайс Е. Д., Миленький М. Н., Сапрыкин Л. Г. Практика прецизионной лазерной обработки. – Мир физики и техники, 2013. С. 212–299.
2. Кононенко Т. В., Конов В. И., Гарков С. В. и др. Сравнительные исследования абляции материалов наносекундными и пико/фемтосекундными импульсами. – Квантовая электроника, 28, №2, (август 1999).
3. Патент № 2032193 РФ МПК G02B5/22. Материал для аподизирующей диафрагмы и способ его изготовления. Непомнящих А. И., Токарев А. Г., Фигура П. В., Черняго Б. П. №4875867/10. Заявлено 23.10.1990. Опубликовано 27.03.1995. Бюл. № 22.
4. Бабаянц Г. И., Гаранин С. Г., Жупанов В. Г., Ключев Е. В., Савкин А. В., Сухарев С.А., Шаров О. А. Разработка и исследование диэлектрических покрытий с высокой лучевой прочностью. Квантовая электроника. 2005. Т. 35, № 7. С. 663–666.
5. Данилейко Ю. К., Маненков А. А., Нечитайло В. С. Лазерное разрушение и рассеяние света в твердых прозрачных диэлектриках. Труды ФИАН, 1978. Т. 101.