

УДК 535:669

## Контролируемое разрушение керамики локальным СВЧ-разрядом

*В. А. Васин*

Федеральное государственное унитарное предприятие "Полигон МТ",  
пос. Новый Быт, Чеховский район, Московская обл.

*Экспериментально изучено взаимодействие электрического СВЧ-разряда с керамикой. Разряд создавался в определенной точке керамики с помощью лазерного излучения, сфокусированного на поверхности образцов, помещенных в СВЧ-резонатор. Для создания СВЧ-поля в резонаторе использовался магнетрон с мощностью 800 Вт на длине волны 12,5 см. В экспериментах применялся неодимовый лазер в режиме модулированной добротности с длиной волны  $\lambda = 1,063$  мкм либо с волной четвертой гармоники  $\lambda = 0,266$  мкм. В обоих случаях был измерен унос материала из пятна, помеченного лазерным пучком. Наблюдался также эффект увеличения уноса материала с диэлектрической поверхности лазерным лучом сквозь слой воды на поверхности диэлектрика.*

Известно, что совместное воздействие лазерного излучения, сфокусированного на поверхность диэлектрика, и сверхвысокочастотного электрического поля при определенных условиях приводит к локальному разрушению

диэлектрика, причем это разрушение оказывается больше, чем можно ожидать, исходя из простого суммирования обоих потоков энергии [1]. Этот эффект можно использовать для электроразрядной размерной обработки диэлектриков [2].

Идея совместного действия двух потоков энергии первоначально основывалась на явлении увеличения поглощения СВЧ-излучения в диэлектриках, предварительно нагретых локальным образом с помощью какого-либо дополнительного источника тепла, поскольку коэффициент поглощения СВЧ-мощности в диэлектрике сильно растет с температурой. Эксперименты по предварительному нагреву диэлектриков лазерным лучом с длиной волны  $\lambda = 1,06$  мкм и со средней энергией импульсов  $\sim 15$  Вт показали, что для включения в действие СВЧ-излучения лазерный луч должен нагреть керамику в месте его попадания на ее поверхность до температуры, близкой к температуре интенсивного испарения материала [1]. Фактически в этих экспериментах наблюдался СВЧ-разряд в паре материала керамики, образованный сфокусированным лазерным лучом. Можно предположить, что этот пар был термически ионизован в степени, достаточной для возникновения в нем СВЧ-разряда. Однако этот разряд не был самоподдерживающимся и в паузах между импульсами лазерного излучения он погасал.

В статье сообщается об аналогичных экспериментах, выполненных с использованием ультрафиолетового излучения, хотя и значительно меньшей средней мощности (порядка 0,12 Вт). В экспериментах использовалась четвертая гармоника (длина волны  $\lambda = 0,266$  мкм) излучения твердотельного лазера на алюмоиттриевом гранате.

### Экспериментальная часть

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки. Для генерации СВЧ-излучения с длиной волны 12,5 см и мощностью  $\sim 800$  Вт использовался магнетрон, излучение которого подавалось в резонатор, в котором устанавливался образец диэлектрика. Энергия СВЧ-излучения практически не поглощалась, так как у испытанных двух типов керамик коэффициент  $\eta$  поглощения излучения при комнатных температурах был пренебрежимо мал.

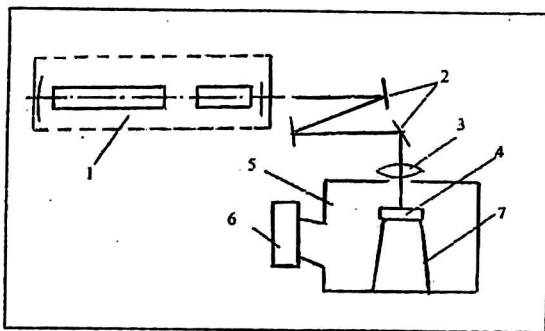


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 — лазер и узел умножения частоты; 2 — зеркала; 3 — кварцевая линза; 4 — образец;  
5 — магнетрон; 6 — СВЧ-резонатор; 7 — подставка под образец

Поэтому заметный нагрев образцов при включении только СВЧ-излучения практически отсутствовал. К сожалению, выходную мощность магнетрона нельзя регулировать. Попытки использовать специальный концентратор поля

в виде заостренного металлического стержня для усиления напряженности СВЧ-поля вблизи диэлектрической поверхности приводили к возникновению случайных разрядов, сопровождающихся неконтролируемым разрушением поверхности. Поскольку возникновение разряда было недостаточно воспроизводимо, от использования концентратора поля пришлось отказаться.

Длительность импульса лазера составляла  $\sim 10$  нс с частотой повторения 25 Гц. Энергия импульса четвертой гармоники излучения достигала 6 мДж при энергии первой гармоники с длиной волны  $\lambda = 1,063$  мкм порядка 70 мДж. Лазерный луч подавался в резонатор через отверстие в верхней части его корпуса и фокусировался на поверхности керамики с помощью кварцевой линзы с фокусным расстоянием 75 мм. Поперечное сечение лазерного луча имело форму, близкую к прямоугольнику, с размерами  $0,12 \times 0,4$  мм в области фокуса.

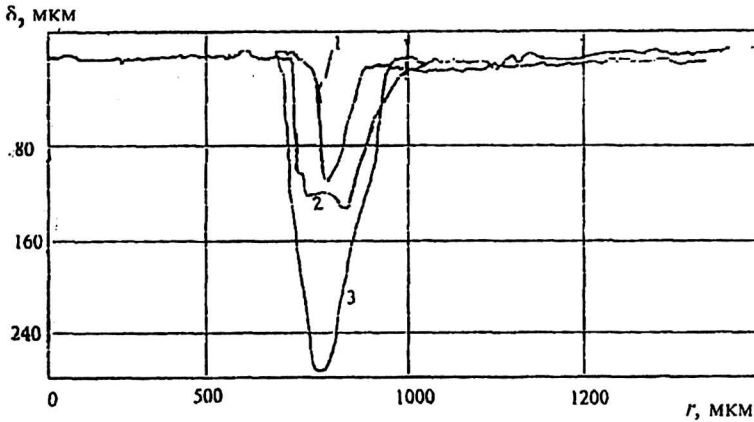
Образцы представляли собой тонкие диски (толщиной 3 мм) алундовой керамики 22ХС и более толстые диски ( $\sim 11$  мм) белой керамики на основе окиси алюминия.

Оценки плотности мощности  $q$  четвертой гармоники лазерного луча в фокусе на поверхности керамики дают величину  $q$  порядка  $(5-7) \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> в каждом импульсе. Согласно одномерной модели теплопроводности, в полуограниченном теле эта величина достаточна для увеличения температуры поверхности образца до  $(2-3) \cdot 10^4$  К к концу лазерного импульса длительностью 10 нс. Это означает, что следует ожидать интенсивное испарение материала в результате действия последовательности лазерных импульсов. Этот вывод тем более справедлив в случае действия первой гармоники лазерного излучения, у которой энергия составляет  $\sim 70$  мДж в импульсе.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

Время воздействия лазерного излучения на образцы в экспериментах составляло 1, 2, 3 и 5 мин. Для совместного действия лазерного и СВЧ-излучений на это же время включался магнетрон. Как уже отмечалось, включение только магнетрона и воздействие одного СВЧ-поля не приводило к возникновению электрического разряда и никак не сказывалось на состоянии образцов керамики. В результате совместного действия обоих видов излучений на поверхности образцов возникали углубления, которые всегда были больше по размеру, чем углубления, созданные только лазерным излучением. Полученные углубления исследовались с помощью профилометра. Примера профилей углублений, полученных при использовании первой гармоники лазерного излучения ( $\lambda = 1,06$  мкм), приведены на рис. 2. Профилограммы совмещены на рис. 2 так, чтобы было заметно различие кривых 1 и 2. Кривая 1 получена только при воздействии лазерного излучения, а кривая 2 — при совместном воздействии СВЧ- и лазерного полей. Эти кривые подтверждают выводы работы [1]:

- в результате совместного действия лазерного излучения и СВЧ-мощности в керамике создаются более глубокие и широкие углубления, чем при действии только лазерного излучения;
- различие между двумя случаями получается более выраженным в случае относительно коротких экспозиций (1—2 мин) образцов действию лазерного луча. Более длительные (5 мин) экспозиции приводят, естественно, к большим размерам углублений, но эффект от включения СВЧ-поля получается относительно менее выраженным, чем при коротких экспозициях.



**Рис. 2. Профили углублений в образцах из керамики 22ХС после 2 мин обработки излучением первой гармоники лазера:**

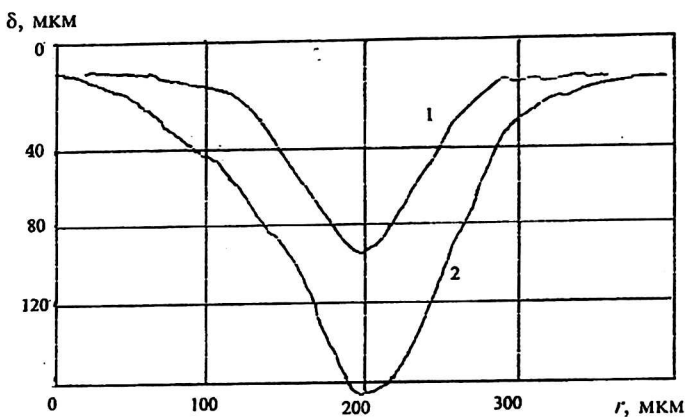
- 1 — с помощью только лазера; 2 — лазером совместно с СВЧ-полем;
- 3 — лазерным лучом, прошедшим сквозь слой воды

Кроме того, в ранее испытанных образцах [1] часто наблюдалось образование трещин вокруг углублений, если длительность воздействия лазера превышала 4 мин. Напротив, в экспериментах, представленных в данной работе, вероятно потому, что средняя мощность лазерного излучения была значительно меньше ( $\sim 1,5$  Вт против 12–15 Вт в первой гармонике в экспериментах работы [1]).

На рис. 2 представлена также профилограмма (кривая 3) углубления, полученного на керамике 22ХС только под действием лазерного излучения (с выключенным СВЧ-полем), когда образец был покрыт слоем воды глубиной 4 мм. Из рисунка видно, что прохождение лазерного луча сквозь слой воды увеличивало разрушение керамики и унос материала из углубления. Качественно аналогичный результат был получен в [3], однако объяснение этого эффекта не было приведено. Этот эффект можно объяснить коллапсом паровых пузырьков на границе раздела сред (воды и твердого тела). Механическое разрушение керамики и удаление материала под действием ударов коллапсирующих пузырьков в жидкости известны как кавитационная эрозия материалов. В исследованном случае пузырьки пара создаются оптическим излучением, нагревающим керамику, и благодаря большой точности фокусировки лазерного луча на детали обещает стать удобным методом размерной обработки твердых непрозрачных материалов [4]. Сравнение профилей 1 и 3 показывает, что оптически возбужденная кавитация сильно увеличивает унос материала по сравнению с непосредственным испарением твердого образца лазерным лучом той же интенсивности.

На рис. 3 приведен пример профилей углублений в образце, полученных при воздействии ультрафиолетового излучения лазера (четвертая гармоника  $\lambda = 0,266$  мкм) вместе с СВЧ-мощностью и без нее. Видно, что сочетание УФ-излучения вместе с СВЧ-излучением приводит к тому же результату, который был установлен ранее [1] и подтвержден в данной работе экспериментами с первой гармоникой излучения лазера (см. кривые 1 и 2 на рис. 2). Более того, глубина разрушения керамики была приблизительно той же, что и в случае применения первой гармоники, хотя мощность УФ-излучения была на порядок меньше, а следовательно, и термическое воздействие на образец должно быть меньше. При постановке данной работы предполагалось,

лось, что возможен режим СВЧ-разряда на поверхности непроводящего материала, из которого под действием лазерного излучения в разряд поступают электроны. К сожалению, энергия фотонов четвертой гармоники неодимового лазера (4,7 эВ) недостаточна для обеспечения фотоэлектронной эмиссии из исследованных здесь диэлектриков. Но так как плотность мощности в фокусе превышает  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup>, не исключены двухфотонное поглощение и эмиссия в результате него электронов. Поэтому УФ-излучение, в отличие от излучения первой гармоники лазера, обеспечивает функционирование разряда электронами, происходящими не только из термически ионизованного пара материала керамики, но и из твердого диэлектрика. Это приводит к тому, что эффект приложения СВЧ-поля проявляется более отчетливо при воздействии на керамику лазерного УФ-излучения. В результате глубина ямки в керамике при включении СВЧ-поля увеличивается практически вдвое согласно кривым 1 и 2 на рис. 3 по сравнению с менее выраженными различиями кривых 1 и 2 на рис. 2.



*Рис. 3. Профили углублений в поверхности керамики 22ХС после 3 мин воздействия четвертой гармоники лазерного излучения:*

1 — с помощью только лазера; 2 — лазером совместно с СВЧ-полем

Однако разделить эффекты фотоэмиттированных электронов и термически ионизованного пара материала в случае использования лазерного УФ-излучения в настоящее время невозможно.

Один из способов увеличения электронной эмиссии из диэлектрика — это введение легко ионизирующихся веществ в область лазерного пятна на поверхности керамики. Однако введение порошкообразной поваренной соли и соды не дало положительного результата, так как при облучении керамики сфокусированным лазерным излучением в ней возникают упругие волны, которые удаляют порошок из зоны воздействия лазера.

---

*Автор благодарит А. И. Ляшенко за помощь в экспериментах с УФ-излучением лазера и В. В. Канцеля за регистрацию профилей на керамике.*

## Литература

1. *Kozyrev S. P., Nevrovsky V. A., Sukhikh L. L., Vasin V. A., Yashnov Yu. M.*// Proc. XVII International Symposium on Electrical Discharges and Insulation in Vacuum, 1996, Berkley. P. 1061—1064.
2. *Невровский В. А.*: Пат. 2024367 России, 1993.
3. *Morita N., Ishida S., Fujimori Y., Ishikawa K.*// Appl. Phys. Lett. 1988. Vol. 52. № 6. P. 1965—1966.
4. *Невровский В. А., Васин В. А., Козырев С. П.*: Пат. 2072302 России, 1993.

## Controlled destruction of ceramics with local microwave discharge

V. A. Vasin

Federal State Enterprise "Polygon MT", Novy Byt, Chekhov district, Moscow region

*Microwave discharge interaction with ceramics was experimentally studied. Discharge was generated at a definite site of ceramics by laser beam, focused at specimen, placed into a microwave cavity. Magnetron was used for microwave generation with power  $\sim 800$  W at wavelength 12.5 cm. Niobium YAG-laser, operated in Q-mode, was used for generation of radiation with wavelength  $\lambda = 1.063$   $\mu\text{m}$  or forth harmonic  $\lambda = 0.266$   $\mu\text{m}$ . In both cases material removal was measured from a spot, marked by the laser beam. Additionally, effect of enhanced material removal from dielectric surface was observed when the laser beam passed through a water layer.*

\* \*

\*