

УДК 535.8
EDN: RBARJN

PACS: 42.62.-b

Формирование сварных соединений стекла и кремния при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов

М. А. Мурзаков, Н. Н. Евтихиев, И. В. Обронов, Д. М. Катаев

Представлены экспериментальные результаты по формированию сварных соединений стекла и кремния при воздействии лазера с длительностью импульса 230 фс. Приведены результаты по измерению геометрии сварных швов соединения стекло-кремний. Установлено, что при увеличении скорости сварки от 30 до 70 мм/с увеличивается ширина сварного шва от 100 до 180 мкм, в то время как глубина сварного шва уменьшается от 100 до 80 мкм. Определено, что стабильное формирование соединения стекло-кремний образуется при энергии импульса в диапазоне от 10 до 17 мкДж. В ходе проведения работы исследована зона перехода стекло-кремний с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM). Определено, что в зоне перехода образуются прочные связи стекла и кремния в результате диффузии химических элементов обоих материалов.

Ключевые слова: фемтосекундный лазер, лазерная сварка, ультракороткий импульс (УКИ), соединение стекло-кремний, микроструктура.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-4-70-75

Введение

Кремний и стекло активно используются в микроэлектромеханических системах (МЭМС), полупроводниковой промышленности. Традиционными способами соединения стекла с кремнием являются клеевой способ и анодный [1]. Данные способы обладают рядом

недостатков – трудности с равномерным нанесением адгезионного материала, длительная выдержка при высокой температуре и электрическом напряжении накладывают ряд ограничений в использовании данных способов. Альтернативой может являться лазерная сварка с использованием лазеров ультракоротких импульсов (УКИ). В отличие от анодного соединения, применение УКИ лазерных источников для сварки стекла и кремния обладает рядом преимуществ: отсутствие длительного высокотемпературного нагрева, высокое пространственное разрешение, отсутствие предварительного нагрева, а также отсутствие использования адгезионных материалов между соединяемыми заготовками.

Стекло и кремний обладают схожими коэффициентами теплового расширения (КТР), что делает сварку с использованием УКИ лазеров более привлекательной для промышленной реализации. Имеется ряд исследований по лазерной сварке стекла с кремнием [2–4]. При сварке стекла с кремнием критической проблемой являются разбрызги-

Мурзаков Максим Александрович¹, вед. эксперт.

E-mail: clericfull@gmail.com

Евтихиев Николай Николаевич^{1,2}, ген. директор, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой.

Обронов Иван Владимирович¹, руководитель, к.ф.-м.н.

Катаев Дмитрий Михайлович¹, оператор.

¹ ООО НТО «ИРЭ-Полюс».

Россия, 141190, Московская обл., Фрязино, пл. Введенского, 3, стр. 5.

² НИЯУ «МИФИ».

Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31.

Статья поступила в редакцию 1.08.2024

После доработки 19.08.2024

Принята к публикации 26.08.2024

Шифр научной специальности: 1.3.19

© Мурзаков М. А., Евтихиев Н. Н., Обронов И. В., Катаев Д. М., 2024

вания расплавленного кремния. При высокой энергии импульса, вызванной избыточной отдачей испарения, давление, оказываемое на слой расплавленного кремния на границе раздела, приводит к резкому ухудшению качества сварного шва. Это объясняется потому, что коэффициент поглощения лазерного излучения α_{Si} увеличивается на много порядков за счет повышения температуры [5, 6], что приводит к дальнейшему повышению температуры на самой поверхности подложки кремния в отличие от случая при сварке стекла с металлом. На выплеск кремния влияет как длительность импульса, так и длина волны лазерного излучения. Так при наносекундной длительности импульса выплеск происходит более интенсивно, что связано с увеличением температуры самого кремния в отличие от использования УКИ лазера. В работе [7] отмечается, что при уменьшении длины волны возрастает коэффициент поглощения лазерного излучения α_{Si} . Авторы работы [4] провели сравнительный анализ двух лазерных источников с длинами волн 532 и 1064 нм, а также с длительностями импульсов наносекундного и пикосекундного диапазонов. Отмечается, при длительности импульса в диапазоне до 12 пс и длине волны 1064 нм величина механических нагрузок при испытании выше, чем при длине волны 532 нм и 120 нс длительности импульса. На данный момент отсутствуют данные по применению лазерных источников с длительностью импульсов от 230 фс при сварке соединения стекло-кремний. Анализ литературных источников показывает, что при уменьшении длительности лазерного импульса уменьшаются выплески кремния в процессе сварки.

Учитывая выше сказанное, целью данной работы является получение стабильного формирования сварных соединений стекло-кремний при воздействии лазеров с длительностью импульсов 230 фс. В ходе исследования получены данные по геометрии сварных соединений стекло-кремний, а также исследована зона перехода стекло-кремний с помощью сканирующей электронной микроскопии. Данная работа является продолжением

работ по сварке УКИ соединений стекло-стекло и стекло-металл [8–10].

Методика исследования и используемое оборудование

В исследовании использовался фемтосекундный волоконный лазер YLPF 10-400-20-R (производства компании НТО «ИРЭ-Полюс») с длиной волны 1030 нм и длительностью импульса 230 фс, параметр качества пучка $M^2 = 1,6$, энергия в импульсе 20 мкДж, максимальная частота следования импульсов 2 МГц. Из-за высокой пиковой мощности и короткой длительности импульса применение лазера с длительностью импульса 230 фс позволяет запустить нелинейные процессы многофотонной и лавинообразной ионизации в стекле и минимизировать вложения энергии при этом для предотвращения оптического пробоя и теплового повреждения образцов. Разогрев происходит за счет электрон-фононного взаимодействия при диссоциации плазмы низкой плотности и может быть аккуратно настроен при регулировке энергии импульсов. Нелинейные процессы поглощения в стекле способствуют поддержанию процесса плавления как самого стекла, так и заготовки из кремния, что при появлении зазоров между заготовками сможет стабилизировать процесс сварки стекла с кремнием за счет стабильности нелинейных эффектов, протекающих в двух заготовках. Помимо этого, использование фемтосекундного источника лазерного излучения также позволяет минимизировать термическое воздействие как на подложку кремния, так и стекла, что приведет к уменьшению напряжений после лазерной сварки.

В качестве свариваемых материалов использовалось стекло марки Borofloat 33 и поликристаллический кремний диаметром 150 мм. Borofloat 33 широко используется для МЭМС в сочетании с кремнием, поскольку коэффициент теплового расширения (КТР) близок к кремнию. Основные физические свойства материалов представлены в таблице.

Таблица

Основные физические свойства материалов

Материал	КТР, 10^{-6} 1/К	Ширина запрещенной зоны, эВ	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Borofloat 33	3,25	3,5	830	1,2
Кремний	4,5	1,12	19,8	149

Согласно работе авторов [11] размер пятна в фокусе $2W_0$ объектива может быть рассчитан по формуле (1):

$$2W_0 = \frac{M^2 \lambda}{\pi NA} \quad (1)$$

где M^2 – безразмерная характеристика качества пучка для лазера, λ – длина волны лазерного источника, NA – числовая апертура объектива. Расчет длины Рэлея при обработке прозрачных диэлектриков выполняется по следующей формуле (2):

$$Z_0 = \frac{M^2 n \lambda}{\pi NA^2} \quad (2)$$

где n – коэффициент преломления среды, в которой происходит обработка материала. В данной работе используется боросиликатное стекло с показателем преломления $n = 1,46$, в качестве фокусирующего объектива использовалась F-theta линза с числовой апертурой $NA = 0,05$. Учитывая формулы (1) и (2) получены следующие оценочные параметры размера пятна и длины Рэлея для данных экспериментов: $2W_0 = 34$ мкм, $Z_0 = 490$ мкм.

Схема реализации экспериментов была следующая: сварка выполняется внахлест, сверху расположена пластина из боросиликатного стекла, которая прозрачная для данной длины волны. Фокус объектива расположен внутри пластины кремния на уровне 100 мкм от верхней грани заготовки. За счет многофотонных процессов поглощения лазерного излучения образуется сварное соединение стекло-кремний, которое в последующем исследовалось. Геометрия сварных соединений исследовалась с использованием оптического микроскопа, в последующем образцы разламывались механическим способом, и зона разлома подвергалась исследованию с по-

мощью сканирующей электронной микроскопии (SEM).

Результаты экспериментов

Образцы боросиликатного стекла и кремния фиксировались друг относительно друга без оптического контакта и без специальной фиксирующей оснастки. После лазерной обработки выполнялись измерения геометрии сварного соединения. Измерения ширины проводились с помощью микроскопа через прозрачную пластину стекла, измерения глубины сварного шва выполнялись с торца полученного соединения.

На рисунке 1 представлены результаты измерения геометрии сварного шва при различных технологических параметрах. Стоит отметить, что не монотонный характер зависимостей получается из-за возникающих зазоров между свариваемыми заготовками. Воздушный зазор между заготовками приводит к высоким потерям ($\approx 30\%$ на каждом интерфейсе стекло-воздух-кремний) из-за большого несоответствия показателей преломления между кремнием, стеклом и воздухом. Кроме того, будучи отличным теплоизолятором, воздух будет препятствовать эффективной передаче тепла, вырабатываемого лазером, а также взаимному проникновению материалов из одного образца в другой – и, таким образом, созданию прочных связей между образцами [12].

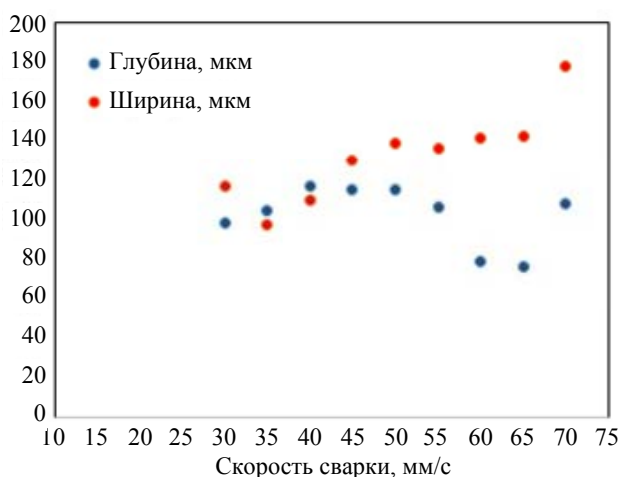
Исследованные образцы из рисунка 1а получены при следующих параметрах: энергия импульса фиксирована и составила значение 15 мкДж. Постоянные параметры для образцов из рисунка 1б – скорость сварки 50 мм/с. Из рисунка 1а видно, что при увеличении скорости сварки от 30 до 70 мм/с ширина сварного шва увеличивается со 100 мкм до 180 мкм, что может быть обусловлено ак-

кумуляцией тепла и последующим плавлением на приповерхностном слое кремния, а глубина сварного шва имеет тенденцию к уменьшению со 100 мкм до 80 мкм. Поскольку выделение тепла происходит на глубине порядка 10^{-4} – 10^{-1} см, на этих глубинах происходит переход энергии в тепло, поглощенной свободными носителями. Перенос энергии от приповерхностного слоя вглубь материала в основном осуществляется теплопроводностью [13]. Поскольку время электрон-фононной релаксации в стекле и кремнии много больше длительности импульсов и много меньше времен распространения тепла за счет теплопроводности на характерные размеры обработки, воздействие импульсов длительностью в 230 фс приводит к тому, что тепло не успевает распространиться вглубь материала и тем самым происходит приповерхностное плавление кремния. Увеличение ширины сварного шва может быть реализовано для получения крепких сварных швов, т. к. площадь сварки между стеклом и кремнием увеличивается в то время, как воздействие непосредственно на кремний уменьшается за счет уменьшения глубины сварного шва, что приводит к уменьшению зоны теплового повреждения и снижению напряжений и количества дефектов

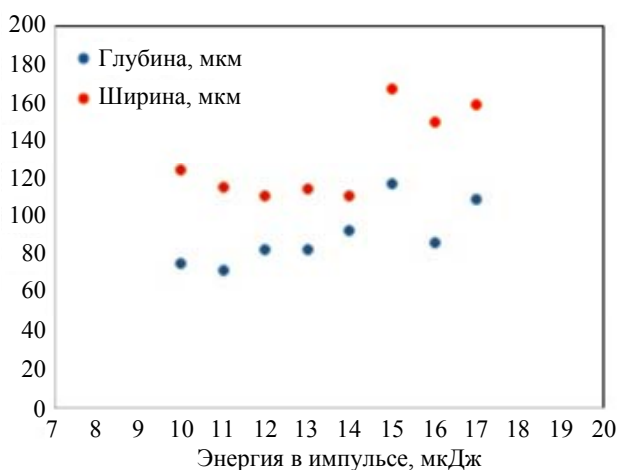
в объеме кремния. Если обратить внимание на рисунок 1б, то увеличение энергии в импульсе прогнозируемо увеличивает как глубину, так и ширину сварного шва.

Далее образцы подверглись механическому разделению и было проведено исследование зоны перехода между стеклом и кремнием после воздействия импульса длительностью 230 фс. На рисунке 2 продемонстрированы результаты исследования зоны перехода с использованием SEM.

Исследование места разлома показало, что часть элементов боросиликатного стекла V_2O_5 присутствует на пластине кремния, на рисунке 2 (а) определяется по содержанию элементов кислорода O (красный цвет). Аналогично на рисунке 2 (б) можно определить, что частицы кремния присутствуют в стекле (желтый цвет). При воздействии лазерного излучения длительностью 230 фс возникает диффузия элементов боросиликатного стекла и кремния, при котором образуются прочные связи Si-O, что наглядно продемонстрировано на рисунке 2. Также из рисунка 2 видно, при механическом разрушении соединения стекло-кремний сварной шов разрушается не полностью, а присутствуют остатки обоих материалов в ответных частях.



а) зависимость ширины и глубины сварного шва от скорости сварки



б) зависимость ширины и глубины сварного шва от энергии импульса

Рис. 1. Зависимость геометрии сварного шва от скорости сварки (а) и энергии в импульсе (б)

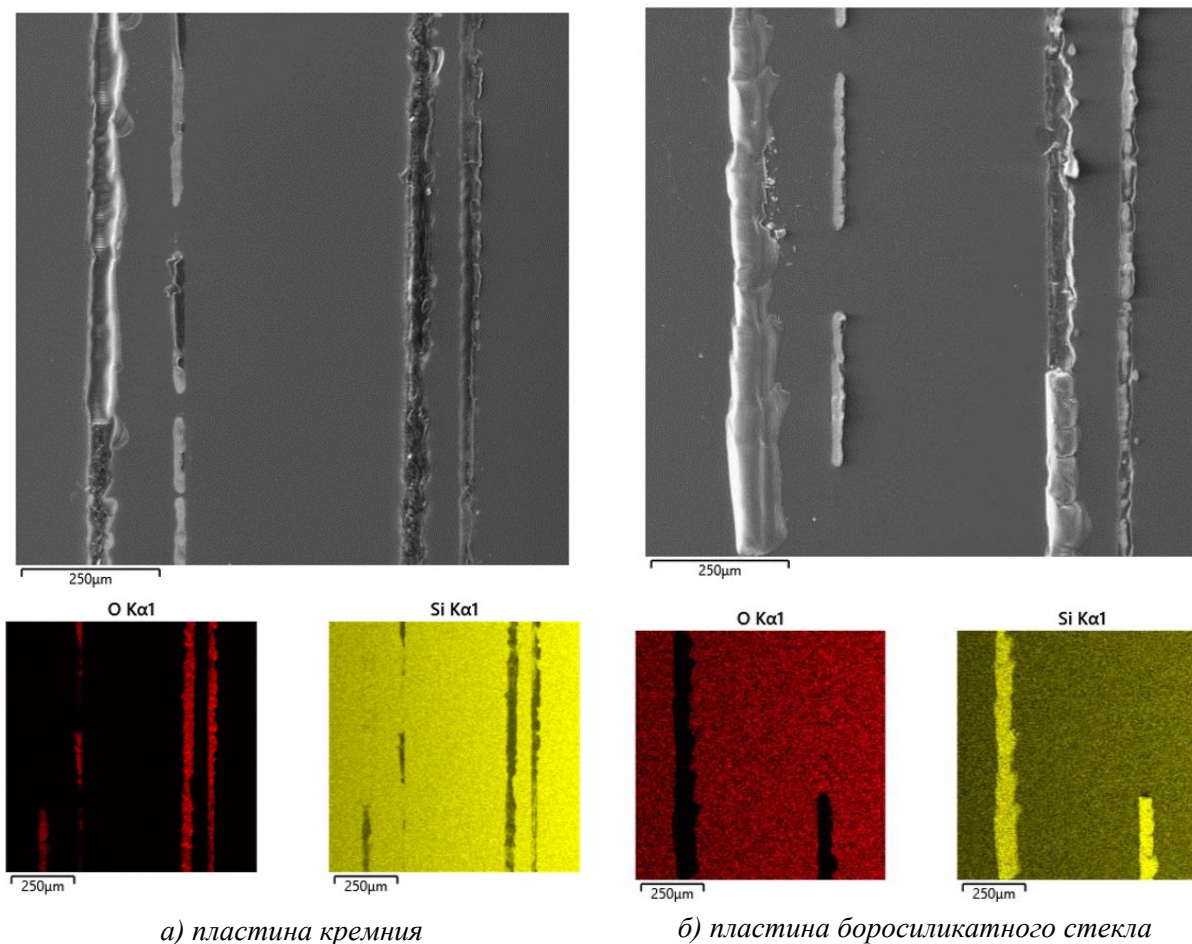


Рис. 2. Результат SEM места разлома сварного шва: (а) пластина кремния, (б) пластина боросиликатного стекла – ответная часть места разлома

Выводы

1. Получены сварные соединения стекло-кремний при воздействии лазерного излучения длительностью 230 фс.

2. Исследование геометрии сварных соединений показало, что при увеличении скорости сварки от 30 до 70 мм/с увеличивается ширина сварного шва от 100 до 180 мкм, в то время как глубина сварного шва уменьшается от 100 до 80 мкм.

3. Стабильное формирование сварного соединения стекло-кремний образуется при энергии в импульсе от 10 до 17 мкДж.

4. Проведено исследование места разлома сварного шва методом SEM, который показал, что при воздействии лазерного импульса длительностью 230 фс происходит взаимная диффузия химических элементов как кремния, так и боросиликатного стекла.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wallis G., Pomerantz D. / J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40. № 10.
2. Carter R. M., Chen J., Shephard J. D., Thomson R. R., Hand D. P. / Appl. Opt. 2014. Vol. 53.
3. Horn A., Mingareev I., Werth A., Kachel M., Brenk U. / Appl. Phys. 2008. Vol. 93. P. 171.
4. Nordin I. H. W., Okamoto Y., Okada A., Jiang H., Sakagawa T. / Appl. Phys. A. 2016. Vol. 122. P. 400.
5. Jellison G. E., Lowndes D. H. / Appl. Phys. Lett. 1982. Vol. 41. P. 594.
6. Rajkanan K., Singh R., Shewcgun J. / Solid State Electronics. 1979. Vol. 22. P. 793.
7. Stolberg K., Kremser B., Friedel S., Atsuta Y. / J. Laser Micro/Nanoeng. 2007. Vol. 2. P. 7.
8. Murzakov M. A., Evtikhiev N. N., Grezev N. V., Kataev D. M., Shevelkina E. D., Kuznetsova D. Yu., Patrina Zh. G. / Laser Phys. Lett. 2023. Vol. 20.
9. Murzakov M. A., Evtikhiev N. N., Grezev N. V., Kataev D. M., Shchekin A. S. / Laser Phys. Lett. 2024. Vol. 21.
10. Мурзаков М. А., Евтихийев Н. Н., Грезов Н. В., Катаев Д. М., Антипов Д. А., Биндюг Д. В. / Квантовая электроника. 2024. № 1. С. 29–34.
11. Eaton S. M. Thermal writing of photonic devices in glass and polymers by femtosecond lasers. – Woodhead Publishing Limited, 2012.

12. Chambonneau M., Li Q., Blothe M., Arumugam S. V., Nolte S. / *Advanced Photonics Research*. 2023. Vol. 4.

13. Климов Ю. М., Майоров В. С., Хорошев М. В. Взаимодействие излучения с веществом. – М.: МИИГАиК, 2014. С. 11–12.

PACS: 42.62.-b

Formation of weld joints glass with silicon using by femtosecond laser pulses

M. A. Murzakov¹, N. N. Evtikhiev^{1,2}, I. V. Obronov¹ and D. M. Kataev¹

¹ LLC “IRE-POLUS” LTD, Department “Laser Technologies”
Bd. 5, 3 Vvedenskiy sq., Fryazino, Moscow Region, 141190, Russia
E-mail: clericfull@gmail.com

² National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)
31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia

Received 1.08.2024; revised 19.08.2024; accepted 26.08.2024

The article presents experimental results on the formation of welded joints of glass and silicon under the action of a laser with a pulse duration of 230 fs. The results of measuring the geometry of welded seams of the glass-silicon joint are presented. It was noted that with an increase in the welding speed from 30 to 70 mm/s, the weld width increases from 100 to 180 μm , while the weld depth decreases from 100 to 80 μm . It was determined that stable formation of the glass-silicon joint is formed at a pulse energy in the range from 10 to 17 μJ . In the course of the work, the glass-silicon transition zone was studied using scanning electron microscopy (SEM). It was determined that strong bonds of glass and silicon are formed in the transition zone due to the diffusion of chemical elements of both materials.

Keywords: femtosecond laser, laser welding, ultrashort pulse (USP), glass-silicon joint, microstructure.

REFERENCES

1. Wallis G. and Pomerantz D., *J. Appl. Phys.* **40** (10) (1969).
2. Carter R. M., Chen J., Shephard J. D., Thomson R. R. and Hand D. P., *Appl. Opt.* **53** (2014).
3. Horn A., Mingareev I., Werth A., Kachel M. and Brenk U., *Appl. Phys.* **93** (2008).
4. Nordin I. H. W., Okamoto Y., Okada A., Jiang H. and Sakagawa T., *Appl. Phys. A*. **122** (2016).
5. Jellison G. E. and Lowndes D. H., *Appl. Phys. Lett.* **41** (1982).
6. Rajkanan K., Singh R. and Shewcgun J., *Solid State Electronics* **22** (1979).
7. Stolberg K., Kremser B., Friedel S. and Atsuta Y., *J. Laser Micro/Nanoeng.* **2** (2007).
8. Murzakov M. A., Evtikhiev N. N., Grezev N. V., Kataev D. M., Shevelkina E. D., Kuznetsova D. Yu. and Patrino Zh. G., *Laser Phys. Lett.* **20** (2023).
9. Murzakov M. A., Evtikhiev N. N., Grezev N. V., Kataev D. M. and Shchekin A. S., *Laser Phys. Lett.* **21** (2024).
10. Murzakov M. A., Evtikhiev N. N., Grezev N. V., Kataev D. M., Antipov D. A. and Bindug D. V., *Quantum electronics* **1** (2024) [in Russian].
11. Eaton S. M. *Thermal writing of photonic devices in glass and polymers by femtosecond lasers*, Woodhead Publishing Limited, 2012.
12. Chambonneau M., Li Q., Blothe M., Arumugam S. V. and Nolte S., *Advanced Photonics Research* **4**, (2023).
13. Klimov Yu. M., Mayorov V. S. and Horoshev M. V. *Interaction of radiation with matter*, Moscow, MIIGAK, 2014 [in Russian].