

УДК 536.331  
EDN: GELGTW

PACS: 44.40.+a

**Динамики переключения кремниевой пластины из низкотемпературного в высокотемпературное состояние при бистабильном режиме радиационного теплообмена с элементами лампового реактора**© В. В. Овчаров<sup>1,2,\*</sup>, А. Л. Куреня<sup>1</sup>, В. П. Пригара<sup>1</sup><sup>1</sup> Ярославский филиал Физико-технологического института им. К. А. Валиева

НИЦ «Курчатовский институт», г. Ярославль, 150007 Россия

\* E-mail: ovcharov.vlad@gmail.com

<sup>2</sup> Ярославский государственный аграрный университет, г. Ярославль, 150042 Россия

Статья поступила в редакцию 9.01.2025; после доработки 14.02.2025; принята к публикации 11.08.2025

Шифр научной специальности: 1.3.11; 1.3.14

*Проведено экспериментальное и теоретическое исследование динамики переключения кремниевой пластины из низкотемпературного в высокотемпературное состояние в термическом реакторе установки термоградиентной обработки пластин в отсутствие термодинамического равновесия. При моделировании процесса переключения кремниевой пластины учтена зависимость температуры поглощения излучения от температуры нагревателя. Выполнено сравнение экспериментальных данных и результатов численного моделирования. Показано, что при значениях переключающего сигнала на ламповом блоке реактора, превышающем критическое значение, наблюдается существенное замедление динамики переключения системы между устойчивыми состояниями вблизи точки бифуркации, заметно увеличивающее время переключения пластины.*

*Ключевые слова:* радиационный теплообмен; температурная и оптическая бистабильность; эффект критического затягивания (замедления); термический реактор; кремниевая пластина; эффективный коэффициент теплообмена; поглотитель.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-4-113-118

**Введение**

Явление оптической бистабильности интенсивно исследуется в последние десятилетия в связи с проблемой создания оптических логических устройств [1]. Возможность существования температурной бистабильности при естественном радиационном теплообмене в материале со скачкообразно возрастающей при увеличении температуры излучательной способностью была показана теоретически в работе [2]. Впервые об экспериментальном обнаружении температурной и оптической бистабильности при радиационном теплообмене докладывалось в работе [3] для кремниевой пластины в термическом реакторе установки быстрого термического отжига (БТО) и

там же был проведен подробный теоретический анализ этого явления в стационарных условиях теплообмена. Время выхода на стационарный режим теплообмена пластины с элементами термического реактора в зависимости от температуры нагревателя находится в пределах от 5 до 10 минут. Однако, длительность быстрых термических процессов в технологии микроэлектроники, для которых, как предполагается, может быть использован этот эффект, в настоящее время лежит в диапазоне от  $10^{-4}$  до  $10^2$  с [4, 5]. То есть они протекают в заведомо нестационарных условиях и поэтому важно понимать, как проявляется эффект бистабильности при столь коротких временах термических процессов.

Целью данной работы является экспериментальное и теоретическое исследование динамики переключения кремниевой пластины из низкотемпературного в высокотемпературное состояние при бистабильном режиме теплообмена пластины с элементами термического реактора установки БТО.

### Модель термического реактора

Экспериментальное исследование динамики переключения кремниевой пластины проводилось в установке термоградиентной обработки пластин, подробное описание которой дано в работе [6]. Блок-схема рабочей камеры установки приведена в работе [6], а схематическое изображение ее реактора представлено на рис. 1. Измерение температуры пластины в стационарном режиме осуществлялось с помощью хромель-алюмелевой термопары, а ее оптические свойства контролировались пирометром М680 с кремниевым датчиком по методике, описанной в работе [3]. В нестационарном режиме контроль температуры с помощью термопары был неэффективен вследствие ее инерционности, и непосредственно контролировались только оптические свойства пластины посредством пирометра. Соответствие между показаниями пирометра и температурой пластины устанавливались расчетным путем, используя разработанную в [3] методику расчета.

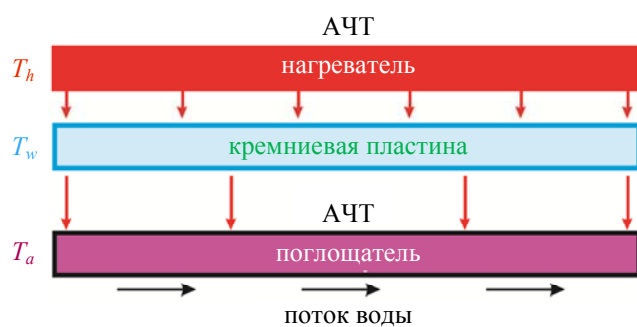


Рис. 1. Модель термического реактора установки термоградиентной обработки пластин

### Экспериментальные результаты

Методика эксперимента проиллюстрирована на рис. 2. На нижнем рисунке 2б показана стационарная температурная петля гистерезиса, соответствующая нагреву (красная

сплошная кривая) и охлаждению (синяя пунктирная кривая) кремниевой пластины в термическом реакторе (см. работу [3]). На верхнем рисунке 2а изображена пирометрическая кривая, соответствующая температурной петле гистерезиса. После предварительного подогрева пластины (точка 0 на температурной и пирометрической передаточных характеристиках) на ламповый блок подается серия ступенчатых сигналов напряжения с амплитудой  $\Delta U$ , величина которой постепенно возрастает. Предполагается, что при малых амплитудах  $\Delta U$  кремниевая пластина остается в низкотемпературном состоянии вплоть до некоторого критического значения амплитуды  $\Delta U_{cr}$ , после которого пластина переходит в высокотемпературное состояние (точка F). Такому переходу соответствует эффект критического затягивания (замедления), описанный в работах [7–9]. Суть эффекта состоит в том, что при амплитудах переключающего сигнала близким к критическим значениям время переключения пластины из низкотемпературного состояния в высокотемпературное может достигать очень больших значений.

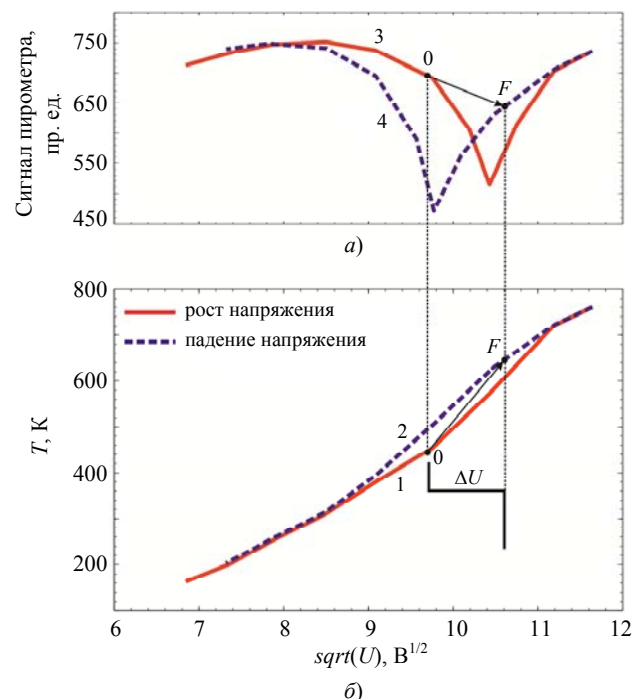
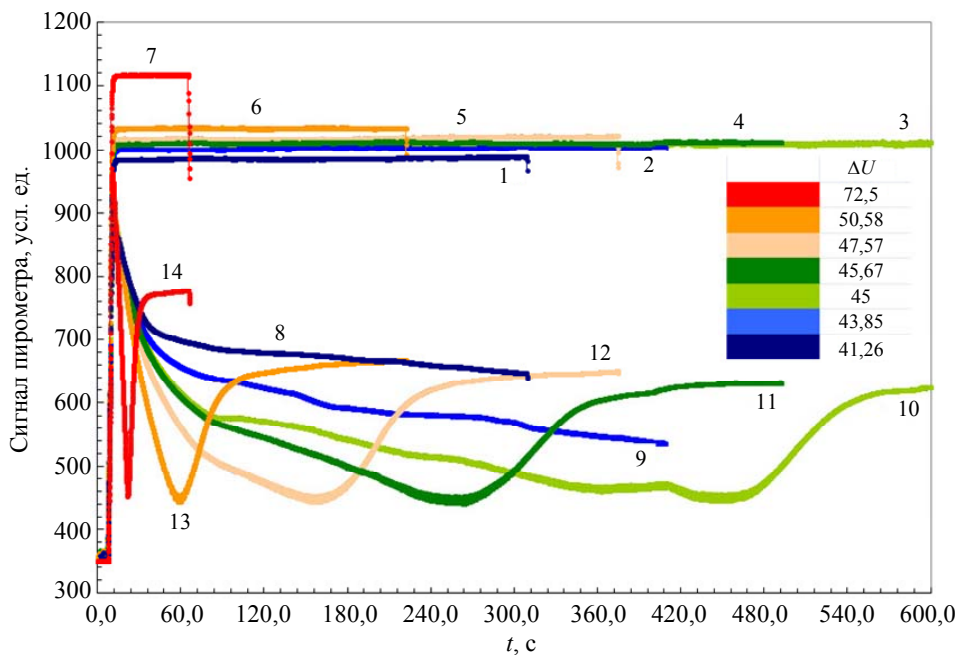


Рис. 2. Переход изображающей точки с низкотемпературной (положение 0) на высокотемпературную ветвь (положение F) передаточной характеристики кремниевой пластины при подаче скачкообразного напряжения на ламповый блок установки БТО. (а) пирометрическая характеристика; (б) температурная передаточная характеристика

На рис. 3 представлена зависимость показаний двух разных пирометрических датчиков от времени при воздействии на пластину скачкообразного изменения плотности потока некогерентного излучения. Первый датчик фиксировал излучение ламп, а второй, расположенный под кремниевой пластиной, сумму прошедшего и собственного излучения пластины. Показаниям первого датчика соответствуют ступенчатые кривые в верхней части рисунка. Значения амплитуды переключающего сигнала  $\Delta U$  указано в легенде к рисунку и соответствует разным цветам этих кривых. В нижней части рисунка расположены пирометрические кривые, снятые вторым датчиком, расположенным под пластиной. Цвета кривых, снятые первым и вторым датчиком одинаковы для одного и того же значения амплитуды  $\Delta U$ . Интерпретация показаний второго пирометра изложена в работе [10].

На пирометрических кривых, снятых вторым датчиком можно выделить четыре участка. На первом участке наблюдается резкий максимум, соответствующий, скачку напряжения на ламповом блоке. На втором участке происходит спад пирометрического сигнала от максимального до минимального значения, которому соответствует увеличение поглощательной и уменьшение пропускательной способности кремниевой пластины с ростом температуры. На этом участке плотность потока прошедшего излучения выше плотности потока собственного излучения пластины. Третьему участку соответствует подъём пирометрического сигнала от минимального значения до значения, соответствующего стационарному значению температуры пластины. На этом участке плотность потока собственного излучения становится выше плотности потока излучения прошедшего через пластину.



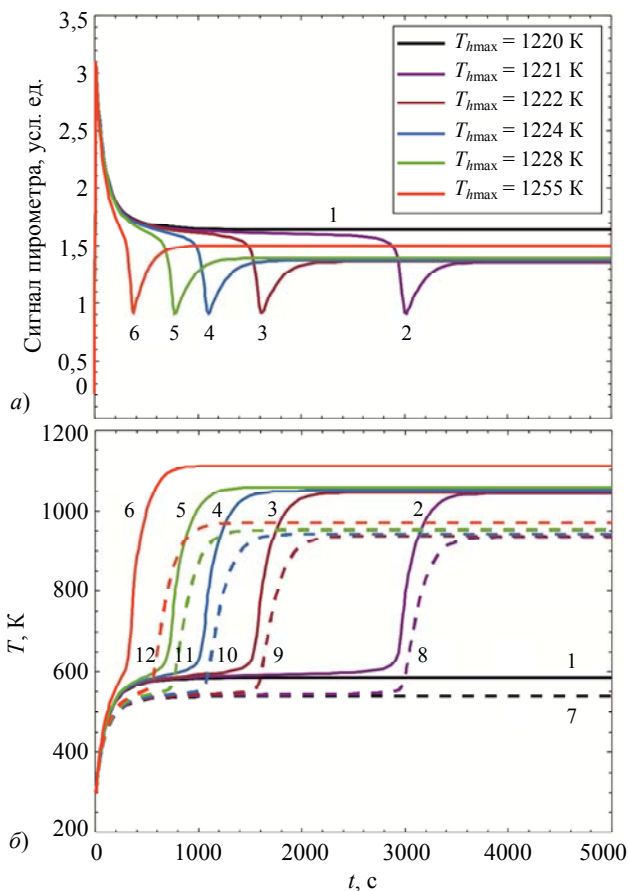
**Рис. 3.** Пирометрические кривые, снятые датчиками излучения пирометра M680. Верхние кривые соответствуют излучению ламп, нижние – комбинации прошедшему кремниевую пластину и собственному излучению пластины

### Моделирование процесса переключения кремниевой пластины и обсуждение результатов

На рис. 4 представлены семейства кривых, описывающих зависимость температуры кремниевой пластины и поглотителя (предполагается, что его температура может меняться в процессе теплообмена с кремниевой пластиной и нагревателем), а также сигнала пирометра,

расположенного под кремниевой пластиной, от времени при скачкообразном увеличении температуры нагревателя от 300 К до значения  $T_{hmax}$ . Значение  $T_{hmax}$  меняется от 1220 К, при котором пластина остаётся в низкотемпературном состоянии, до 1255 К, соответствующем быстрому переключению пластины в высокотемпературное состояние. Зависимости температуры кремниевой пластины  $T_w(t)$  и поглотителя  $T_a(t)$  от времени

получены в результате решения системы нестационарных уравнений теплового баланса для пластины и поглотителя, выведенных в работе [11] с использованием приближения серых тел. При расчётах толщина кремниевой пластины предполагалась  $d_w = 450$  мкм. Остальные параметры выбирались из соображений наибольшей близости вида теоретической и экспериментальных пирометрических кривых:  $h_{\text{eff}} = 50$  Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $h_1 = 80$  Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $c_a \rho_a d_a = 5 \times 10^3$  Дж/(м<sup>2</sup>·К),  $T_0 = 300$  К.



**Рис. 4.** Расчётная зависимость сигнала пирометра (а), температуры кремниевой пластины (сплошные кривые) и поглотителя (пунктирные кривые) (б) от времени при ступенчатом увеличении температуры нагревателя от 300 К до температуры  $T_{h\max}$

Анализ рис. 4б показывает, что критическое значение максимальной температуры нагревателя  $T_{h\max}$  лежит между значениями 1220 и 1221 К. При  $T_{h\max} = 1220$  К кремниевая пластина находится ещё в низкотемпературном состоянии (чёрные кривые), а при  $T_{h\max} = 1221$  К пластина переходит в высокотемпературное состояние, хотя и с большим временем задержки  $\sim 3000$  с. На рис. 4а низ-

котемпературному состоянию соответствует самая высокая (чёрная) пирометрическая кривая, характеризующая полупрозрачное состояние пластины. Переключению пластины на рисунке 4а соответствует фиолетовая кривая, причём скачку температуры пластины при её переключении соответствует резкий минимум на пирометрической кривой. Дальнейшее увеличение температуры, вплоть до  $T_{h\max} = 1228$  К не меняет вида температурных и пирометрических кривых, а лишь сдвигает температурный скачок, соответствующий переходу пластины в высокотемпературное состояние влево вдоль оси времени. При этом максимальное значение температуры кремниевой пластины, примерно, 1200 К, практически, не меняется. Дальнейшее увеличение  $T_{h\max}$  не только уменьшает время переключения пластины, но и приводит к быстрому увеличению её максимальной температуры. Так увеличение  $T_{h\max}$  на 17 К от 1228 до 1255 К приводит к увеличению максимального значения температуры пластины на 200 К (красные кривые на рис. 4а и 4б).

Сравнение экспериментальных (рис. 3) и расчётных (рис. 4а) пирометрических кривых показывает, что критическое значение амплитуды скачка напряжения на ламповом блоке  $\Delta U_{cr}$  находится в диапазоне между 41,26 и 43,85 В. Сдвиг минимума экспериментальной пирометрической кривой в диапазоне амплитуд переключающего напряжения от 43,85 до 47,57 В при не меняющемся значении пирометрической кривой на конечном участке, позволяет сделать вывод о наличии критического затягивания в процессе переключения кремниевой пластины из низкотемпературного в высокотемпературное состояние. Дальнейшее увеличение  $\Delta U$  приводит к существенному уменьшению времени переключения и увеличению температуры пластины в полном соответствии с поведением теоретических кривых.

## Заключение

В работе исследована динамика переключения кремниевой пластины из низкотемпературного в высокотемпературное состояние в зависимости от величины скачка напряжения  $\Delta U$  на ламповом блоке установ-

ки термоградиентной обработки пластин. Проведено сравнение экспериментальных данных и результатов численного моделирования. Показано, что существует критическое значение  $\Delta U_{cr}$ , при котором происходит переключение пластины. Получено экспериментальное подтверждение существования явления критического затягивания (замедления) при переключении пластины в термическом реакторе при значениях амплитуды  $\Delta U$ , превышающих критическое значение  $\Delta U_{cr}$ .

Работа выполнена в рамках Государственного задания Физико-технологическому институту им. К. А. Валиева НИЦ «Курчатовский институт» по теме № FFNN-2022-0018.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гиббс Х. Оптическая бистабильность: управление светом с помощью света. – М.: Мир, 1988.

2. Рудаков В. И., Овчаров В. В., Пригара В. П. / Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. № 16. С. 79–87. doi: 10.1134/S1063785008080282.

3. Rudakov V. I., Ovcharov V. V., Kurennya A. L., Prigara V. P. / Microelectronic engineering. 2012. Vol. 93. P. 67–73. doi: 10.1016/j.mee.2011.11.018.

4. Kennel H. W., Giles M. D., Diebel M., Keys P. H., Hwang J., Govindaraju S., Liu M., Budrevich A. / 14th IEEE International Conference on Advanced Thermal Processing of Semiconductors RTP. – Kyoto, 2006. P. 85–91. doi: 10.1109/RTP.2006.367986.

5. Alptekin E., Ozturk M. C., Misra V. / IEEE Electron Device Lett. 2009. Vol. 30. № 4. P. 331–333. doi: 10.1109/LED.2009.2014182.

6. Мочалов Б. В., Рудаков В. И. / Приб. Техн. Эксп. 1996. № 2. С. 155–157.

7. Tredicce J. R., Lippi G. L., Mandel P., Charasse B., Chevalier A., Picqué B. / American Journal of Physics. 2004. Vol. 72. № 6. P. 799–809. doi: 10.1119/1.1688783.

8. Garmire E., Marburger J. H., Allen S. D., Winful H. G. / Applied Physics Letters. 1979. Vol. 34. № 6. P. 374–376. doi: 10.1063/1.90794.

9. Любин В. М., Тихомиров В. К. / Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 55. Вып. 1. С. 25–28.

10. Ovcharov V. V., Kurennya A. L., Rudakov V. I., Prigara V. P. / International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016. SPIE. 2016. Vol. 10224. P. 510–521. doi: 10.1117/12.2266553.

11. Rudakov V. I., Kurennya A. L., Ovcharov V. V., Prigara V. P. / International Conference Micro- and Nano-Electronics 2012. SPIE. 2013. Vol. 8700. P. 59–69. doi: 10.1117/12.2018016.

PACS: 44.40.+a

## Silicon wafer switching dynamics from low temperature to high temperature state in bistable mode of radiation heat exchange with elements of a lamp reactor

V. V. Ovcharov<sup>1,2,\*</sup>, F. L. Kurennya<sup>1</sup> and V. P. Prigara<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Yaroslavl Department of Valiev Institute of Physics and Technology "NRC "Kurchatov Institute", Yaroslavl, 150007 Russia

\* E-mail: ovcharov.vlad@gmail.com

<sup>2</sup> Yaroslavl State Agrarian University, Yaroslavl, 150042 Russia

Received 9.01.2025; revised 14.02.2025; accepted 11.08.2025

*The switching dynamics of a silicon wafer from low temperature to high temperature states in the thermal reactor of the thermogradient treatment setup has been experimentally and theoretically carried out under conditions far from thermodynamic equilibrium. The simulation of the switching process in the silicon wafer has been considered with regard to radiative absorber temperature versus temperature of heater. The comparison of the experimental data and the calculated results has been made. It is shown that when the control switching signal values on the lamp block of the reactor exceed the critical value, the effect of critical delay (slowing down) has been observed, significantly increasing the switching time of the wafer.*

**Keywords:** radiation heat exchange; optical and temperature bistability; the effect of critical delay (slowing down); a thermal reactor; a silicon wafer; an effective heat exchange coefficient; a radiative absorber.

## REFERENCES

1. Gibbs H. M., Optical bistability: controlling Light with light. NY, Academi Press, Inc., 1985.
2. Rudakov V. I., Ovcharov V. V. and Prigara V. P., Technical Physics Letters **34**, 718–721 (2008). doi: 10.1134/S1063785008080282.
3. Rudakov V. I., Ovcharov V. V., Kurenaya A. L. and Prigara V. P., Microelectronic engineering **93**, 67–73 (2012). doi: 10.1016/j.mee.2011.11.018.
4. Kennel H. W., Giles M. D., Diebel M., Keys P. H., Hwang J., Govindaraju S., Liu M. and Budrevich A., 14th IEEE International Conference on Advanced Thermal Processing of Semiconductors RTP. Kyoto, 2006, pp. 85–91. doi: 10.1109/RTP.2006.367986.
5. Alptekin E., Ozturk M. C. and Misra V., IEEE Electron Device Lett. **30** (4), 331–333 (2009). doi: 10.1109/LED.2009.2014182.
6. Mochalov B. V. and Rudakov V. I., Instruments and Experimental Techniques **39** (2), 302–304 (1996).
7. Tredicce J. R., Lippi G. L., Mandel P., Charasse B., Chevalier A. and Picqué B., American Journal of Physics **72** (6), 799–809 (2004). doi: 10.1119/1.1688783.
8. Garmire E., Marburger J. H., Allen S. D. and Winful H. G., Applied Physics Letters **34** (6), 374–376 (1979). doi: 10.1063/1.90794.
9. Lyubin V. M. and Tikhomirov V. K., JETP letters **55** (1), 23–26 (1992).
10. Ovcharov V. V., Kurenaya A. L., Rudakov V. I. and Prigara V. P., International Conference on Micro-and Nano-Electronics 2016. SPIE **10224**, 510–521 (2016). doi: 10.1117/12.2266553.
11. Rudakov V. I., Kurenaya A. L., Ovcharov V. V. and Prigara V. P., International Conference Micro-and Nano-Electronics 2012. SPIE **8700**, 59–69 (2013). doi: 10.1117/12.2018016.

## Об авторах

**Овчаров Владимир Викторович**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Ярославский филиал Физико-технологического института им. К. А. Валиева НИЦ «Курчатовский институт» (Россия, 150007, г. Ярославль, Университетская, 21); Ярославский государственный аграрный университет (Россия, 150042, г. Ярославль, Тутаевское шоссе, 58). E-mail: ovcharov.vlad@gmail.com SPIN-код РИНЦ 6897-2529, Author ID 9065

**Куреня Алексей Леонидович**, ведущий электроник, Ярославский филиал Физико-технологического института им. К. А. Валиева НИЦ «Курчатовский институт» (Россия, 150007, г. Ярославль, Университетская, 21). E-mail: ftian.alex@mail.ru

**Пригара Валерия Павловна**, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Ярославский филиал Физико-технологического института им. К. А. Валиева НИЦ «Курчатовский институт» (Россия, 150007, г. Ярославль, Университетская, 21). E-mail: prigalera@yandex.ru SPIN-код РИНЦ 4903-1219, Author ID 138758