

структурой корунда. Состав метастабильных включений соответствует твёрдым растворам основных фаз и оксидов кальция алюминия, магния.

Проведённые испытания показали, что разработанная керамика может входить в состав устройств, генерирующих импульсное ИК-излучение.

Работа выполнена при финансовом содействии Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь (договор Х22УЗБ-033).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Applications and Outlook for Electronic Terahertz Technology / Van der Weide D. // *Optics&PhotonicsNews*. – 2003. – Vol. 14. – № 4. – С. 48–53.
2. Синтез люминесцентных органо-неорганических гибридных материалов твердофазным методом / Секачева А.Ю., Рунина К.И. // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2020. – Т. 34. – №4(227). – С. 80–82.
3. Фононный механизм преобразования в керамических материалах / Рахимов Р. Х., Ермаков В. П., Рахимов М. Р. // *Computational nanotechnology*. – 2017. – № 4. – С. 21–35.
4. Высокотемпературные радиопрозрачные керамические композиционные материалы для обтекателей антенн и других изделий авиационной техники / Ивахненко Ю.А., Варрик Н.М., Максимум В.Г. // *Труды ВИАМ*. –2016. –№5(41). –С. 36–43.
5. Новые методы модифицированной керамической технологии для синтеза функциональных наноструктурированных систем/ Паньков В.В., Ивашенко Д.В. // *Computational nanotechnology*. –2021. –Т. 8. –№ 2. –С. 18–23.
6. Patent № US 6,251,306 B1 Infrared radiation emitting / Rakhimov R. // Jun. 26, 2001
7. Crystal structure and properties of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Cr}_2\text{O}_3$ solid solutions with different Cr_2O_3 contents / Zhao Pengda; Zhao Huizhong; Yu Jun // *Ceramics International*. – 2018. – Vol. 44. – Issue 2. – P. 1356–1361.
8. Thermochemical analysis and modeling of the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Cr}_2\text{O}_3$, $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$, and $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Cr}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ systems relevant to refractories / Besmann T.M., Kulkarni N.S. // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2006. – Vol. 89. – Issue 2. – P. 638–644.

ГЕНЕРАЦИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В КРЕМНИИ ТЕРАГЕРЦЕВЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Д. А. Подрябинкин¹, А. Г. Трафименко¹, А. Л. Данилюк¹,
И. В. Комиссаров¹, С. Л. Прищепа^{1,2}

¹) *Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
П.Бровки 6, 220013 Минск, Беларусь,*

²) *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Каширское шоссе 31, 115409 Москва, Россия
e-mail: podryabinkin@bsiur.by*

Представлены результаты моделирования генерации электронов при воздействии ТГц импульсов длительностью 2–4 пс в приповерхностном слое кремния протяженностью 4,5 мкм. Показано, что для гармонического ТГц импульса длительностью 2 пс достигается концентрация электронов $10^{19}\text{--}10^{22}\text{ см}^{-3}$ при напряженности поля 10–12 МВ/см. Установлены закономерности влияния напряженности поля, периода и длительности гармонического ТГц импульса на динамику генерации электронов.

Ключевые слова: кремний; терагерцевый импульс; ударная ионизация; генерация электронов; осцилляции концентрации.

GENERATION OF CHARGE CARRIERS BY TERAHERTZ PULSES IN SILICON

D. A. Podryabinkin¹, A. G. Trafimenko¹, A. L. Danilyuk¹,
I. V. Komissarov¹, S. L. Prischepa^{1,2}

¹) *Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P. Browka, 6, 220013 Minsk, Belarus*

²) *National Research Nuclear University "MEPhI" Kashirskoe highway 31, 115409 Moscow, Russia*

Corresponding author: D. A. Podryabinkin (podryabinkin@bsiur.by)

The simulation results of electron generation under the influence of THz pulses with a duration of 2-4 ps in a near-surface silicon layer with a length of 4.5 μm are presented. It is shown that for a harmonic THz pulse with a duration of 2 ps, an electron concentration of 10^{19} – 10^{22} cm^{-3} is achieved at a field strength of 10–12 MV/cm. The regularities of the influence of the field strength, the period and duration of the harmonic THz pulse on the electron generation dynamics are revealed.

Key words: silicon; terahertz pulse; impact ionization; electron generation; concentration oscillations.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования генерации носителей заряда в полупроводниках в поле электромагнитного излучения дальнего инфракрасного и терагерцевого (ТГц) диапазонов представляют существенный интерес для управления свойствами материалов, составляющих физическую основу при реализации сверхбыстродействующих электронных и оптоэлектронных устройств. Развитие этого направления стало возможным благодаря созданию источников когерентного ТГц излучения высокой интенсивности и развитию методов его детектирования [1, 2]. Большое распространение получили методы формирования ТГц импульсов при взаимодействии фемтосекундного лазерного излучения с различными материалами и структурами, например, медной фольгой [3], гетероструктурой CoFe/графен [4], нелинейным органическим кристаллом DSTMS [5].

Генерация неравновесных носителей заряда в кремнии ТГц импульсами существенно отличается от генерации электронно-дырочных пар фемтосекундным лазерным излучением в оптической области спектра. Энергия фотонов в ТГц диапазоне на два порядка меньше, чем в оптическом, поэтому основным механизмом генерации носителей заряда является ударная ионизация. Исследования генерации носителей заряда за счет ударной ионизации представляют не только фундаментальный интерес, но и имеют большое практическое значение при разработке материалов солнечных элементов с высокой эффективностью и чувствительных детекторов фотонов, для понимания физики разрушения диэлектриков фемтосекундными лазерными импульсами, генерации высших гармоник, активного управления ТГц волнами и приложений, таких как модуляторы ТГц диапазона [5]. Активно развивающимся направлением является создание оптических межсоединений для ИМС [6].

В данной работе приведены результаты моделирования генерации электронов ТГц импульсами в приповерхностной области p -Si протяженностью несколько мкм,

в которой коэффициент ударной ионизации и временная зависимость напряженности поля ТГц импульса не зависят от расстояния.

МОДЕЛЬ

Для расчета временной зависимости концентрации генерированных электронов проводимости в кремнии р-типа использовалось уравнение кинетики без учета процесса рекомбинации неравновесных носителей заряда по причине существенной разности временных масштабов процесса ударной ионизации и Оже-рекомбинации. Характерное время процесса рекомбинации в кремнии при ударной ионизации составляет порядка 10^{-6} – 10^{-7} с [5]. Исходя из предположения, что ТГц импульс имеет квазистационарный характер, скорость генерации электронов проводимости n определяется уравнением вида [7]:

$$\frac{dn}{dt} = \alpha_n n v_d, \quad (1)$$

где t – время, α_n и v_d – соответственно коэффициент ударной ионизации и дрейфовая скорость электронов, определяемые напряженностью электрического поля в импульсе. Коэффициент α_n определяется как число электронно-дырочных пар, генерируемых носителем заряда на единице длины траектории, и является весьма резкой функцией напряженности электрического поля E [7]. Для него справедливо следующее выражение, полученное на основе экспериментальных данных для кремния [7, 8]:

$$\alpha_n = \frac{qE}{\varepsilon_1} \exp \left[-\frac{E_1}{E(1 + E/E_p) + E_{кТ}} \right], \quad (2)$$

где ε_1 – пороговая энергия ударной ионизации, q – элементарный заряд, $E_{кТ}$, E_p , E_1 – пороговые электрические поля, при превышении которых начинают проявляться эффекты замедления носителей заряда за счет испускания тепловых и оптических фононов, а также ионизационных потерь соответственно.

Для электронов в Si, $\varepsilon_1=3,6$ эВ, $E_1=(1,4-1,95) \cdot 10^6$ В/см, $E_p=(1,07-2,384) \cdot 10^5$ В/см, $E_{кТ} = (0,975-1,38) \cdot 10^4$ В/см [8]. Величина α_n в кремнии при температуре 300 К в поле 10^6 В/см составляет порядка 10^5 см $^{-1}$.

При ударной ионизации распределение электронов по энергии характеризуется эффективной температурой T_e , превышающей температуру решетки T . Уравнение, определяющее температуру T_e , получается из условия равенства скорости поступления энергии в электронную подсистему от электрического поля и скорости, с которой эта энергия переходит из электронной подсистемы в решетку за счет испускания фононов [7]. В итоге дрейфовая скорость электронов v_d нелинейно зависит от напряженности поля, а также ряда других факторов. В данной работе мы используем выражение, полученное в [9] путем фиттирования экспериментальных данных для кремния:

$$v_d = \mu_0 E \left[1 + \frac{1}{(1/s) + (N_r/N)} + \frac{(E/E_a)^2}{(E/E_a) + g} + \left(\frac{E}{E_b} \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad (3)$$

где значения параметров: подвижность электронов $\mu_0=1400$ см 2 /В·с; $s=350$; $N_r = 3 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$; $E_a = 3,5 \cdot 10^3$ В/см; $g = 8,8$; $E_b = 7,4 \cdot 10^3$ В/см, N – концентрация леги-

рующей примеси. Скорость v_d насыщается в полях $E = (4-5) \cdot 10^4$ В/см до величины 10^7 см/с при $T = 300$ К [7].

Будем рассматривать приповерхностную область кремния, в которой напряженность поля $E(t)$ и коэффициент α_n можно считать не зависящим от расстояния z , т.е. форма ТГц импульса соответствует падающему излучению. Для кремния это справедливо для слоя протяженностью $\Delta z = 4,5$ мкм [5]. В последующих слоях толщиной Δz_{i+1} , напряженность поля меняется и пересчитывается согласно выражению $E_{i+1}(t,z) = E_i(t,z) [1 - \exp(-0,5\alpha\Delta z_{i+1})] / (0,5\alpha\Delta z_{i+1})$, где $E_i(t,z)$ – напряженность поля в предыдущем слое, α – коэффициент поглощения, i – номер слоя.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчеты проводились для трех видов ТГц импульсов. Первый из них (модельный) длительностью 2 пс характеризуется наличием периодических колебаний с различным значением периода, $T_1 = 0,1-10$ пс, рис. 1 (вставка). Два других являются экспериментальными ТГц импульсами, полученными в работах [4] и [5], рис.4. В результате проведенных расчетов получены временные зависимости изменения концентрации генерированных электронов в кремнии р-типа (концентрация равновесных электронов 10^5 см⁻³, концентрация равновесных дырок $2,1 \cdot 10^{15}$ см⁻³) в приповерхностном слое в зависимости от максимальной напряженности поля E_m и периода модельного импульса, а также формы экспериментальных импульсов.

Результаты расчетов концентрации генерированных электронов для модельного ТГц импульса представлены на рис.1-3. Наблюдается достижение концентрации генерированных электронов равной концентрации равновесных дырок за время 1,2-1,5 пс, рис.1,2, затем рост на 3-7 порядков за оставшиеся 500-700 фс. Полученные временные зависимости концентрации генерированных электронов весьма чувствительны к изменению напряженности поля E_m . Так при уменьшении E_m с 12 до 10 МВ/см концентрация электронов падает в 250 раз, рис.1. Влияние роста напряженности поля в импульсе E_m в данном случае состоит в увеличении коэффициента ударной ионизации и, соответственно, скорости роста электронной концентрации. При постоянной E_m и варьировании периода ТГц импульса на зависимости $n(t)$ проявляются полки (области постоянной концентрации), временная протяженность, количество и соответствующая им концентрация электронов существенно зависят от периода импульса. Наиболее ярко выражены полки для значений периода импульса в области от 0,9 до 3 пс, рис.2. При уменьшении периода до 0,2 пс протяженность полок существенно падает, а их количество растет, рис.1. Дальнейшее снижение периода ведет к исчезновению полок. С ростом периода, наоборот, протяженность полок увеличивается, а их количество падает.

При $T_1 = 0,9-1,0$ пс возникает 4 полки, а при $T_1 = 2$ и 3 пс, уже только одна. Дальнейший рост периода до 5 пс ведет к исчезновению полки, также как при уменьшении периода. Однако при большом периоде (5 пс) в отличие от малого (0,1-0,2 пс) рост концентрации электронов в начальный промежуток времени порядка 500 фс существенно замедлен. Это можно объяснить формой импульса: при малом периоде его положительный фронт существенно круче, чем при большом. Такая динамика объясняется тем, что из-за уменьшения периода ТГц импульса скорость нарастания концентрации электронов не успевает заметно снизиться, что не дает формироваться полке, как при больших периодах. На рис. 3 приведена зависимость концентрации генерированных электронов в момент окончания импульса ($t = 2$ пс) в зависимости

от периода ТГц импульса при $E_m = 12$ МВ/см. Как видно, концентрация электронов является колебательной функцией периода, амплитуда которой существенно растет с ростом периода. Также с ростом периода резко увеличивается разность между максимальными и минимальными значениями электронной концентрации, рис.3. Это обстоятельство отражает характер изменения параметров полков на временной зависимости концентрации генерированных электронов.

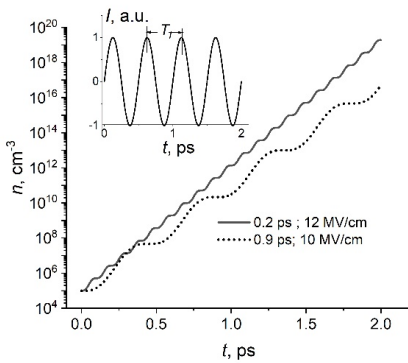


Рисунок 1. Временная зависимость концентрации генерированных электронов для модельного импульса при $T_1 = 0,2$ пс, $E_m = 12$ МВ/см и $T_1 = 0,9$ пс, $E_m = 10$ МВ/см. Вставка – вид модельного ТГц импульса

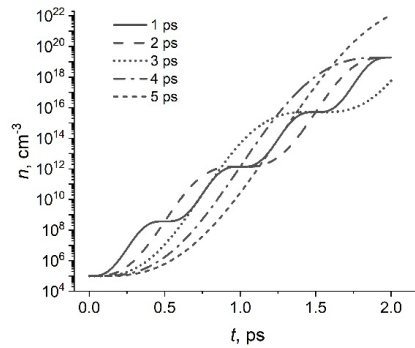


Рисунок 2. Временная зависимость концентрации генерированных электронов для модельного импульса при $T_1 = 1-5$ пс, $E_m = 12$ МВ/см

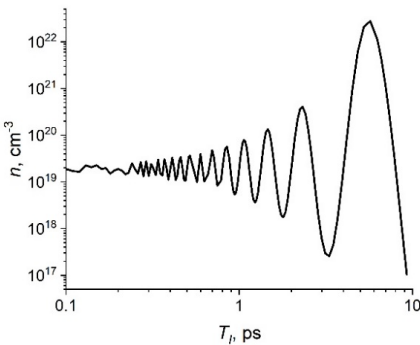


Рисунок 3. Зависимость концентрации генерированных электронов проводимости от периода ТГц модельного импульса при $t = 2$ пс, $E_m = 12$ МВ/см

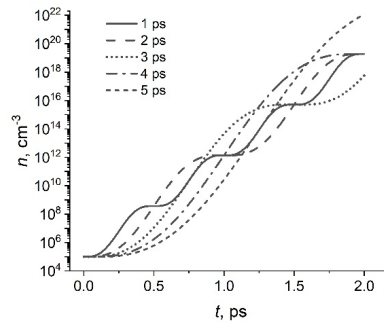


Рисунок 4. Вид ТГц импульсов из [4] (Pulse 1) и [5] (Pulse 2). Вставка - концентрация генерированных электронов: $E_m = 30$ МВ/см (Pulse 1), $E_m = 25$ МВ/см (Pulse 2)

Полученные зависимости $n(t)$ обусловлены тем, что скорость ударной ионизации определяется динамикой напряженности поля в импульсе. Области роста концентрации электронов соответствуют росту напряженности в импульсе. Полки возникают при падении мгновенной напряженности поля, когда значения α_n и v_d резко снижаются, но концентрация генерированных электронов не уменьшается, так как время

релаксации, определяемое процессом Оже-рекомбинации, составляет для Si в среднем 10^{-7} – 10^{-6} с, что существенно больше рассматриваемых промежутков времени, определяемых длительностью ТГц импульсов.

Для импульса из [4], приведенного на рис. 4 (Pulse 1), в рамках данной модели достижение $n = 10^{15}$ см $^{-3}$ происходит за время около 3 пс, а $n = 10^{19}$ см $^{-3}$ – за 4 пс, если величина $E_m = 30$ МВ/см. При этом на зависимости $n(t)$ отсутствуют полки, что обусловлено данной формой импульса, рис. 4 (вставка). Как показали проведенные расчеты, воздействие такого импульса идентично воздействию постоянного поля с напряженностью 3 МВ/см.

Для импульса из [5], приведенного на рис. 4 (Pulse 2), достижение концентрации генерированных электронов порядка 10^{19} см $^{-3}$ за 2 пс наблюдается, если величина E_m не менее 25 МВ/см, рис. 4 (вставка). При этом в рамках данной модели (выражения (1)–(3)) на временной зависимости концентрации электронов также отсутствуют полки, что не соответствует результатам, полученным в рамках используемой в [5] модели, в которой произведение $\alpha_n v_d$ (см. уравнение (1)) пропорционально квадрату энергии электронов. В уравнениях (1)–(3) для коэффициента ударной ионизации и дрейфовой скорости использованы выражения, соответствующие экспериментальным данным для кремния в рассматриваемом диапазоне изменения напряженности поля. Отличия, видимо, связаны с использованием различных выражений для произведения $\alpha_n v_d$. Так, в модели [5] отсутствует ограничение энергии электронов сверху с ростом напряженности поля и соответственно их дрейфовой скорости в отличие от используемого в данной работе выражения (3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено моделирование генерации электронов при воздействии ТГц импульсов на *p*-Si. Рассмотрены импульсы, соответствующие экспериментальным данным, а также модельный гармонический импульс с различным периодом. Показано, что для экспериментальных импульсов достижение концентрации генерированных электронов порядка 10^{19} см $^{-3}$ за время 2–4 пс происходит при напряженности поля в импульсе не менее 25–30 МВ/см. Для модельных гармонических импульсов с периодом в диапазоне 0,1–5 пс и длительностью 2 пс концентрация электронов 10^{19} – 10^{22} см $^{-3}$ достигается при напряженности поля 10–12 МВ/см. Установлены особенности влияния периода модельного ТГц импульса на динамику роста концентрации генерированных электронов, состоящие в модификации областей постоянной концентрации (полок). Показано, что с уменьшением периода импульса протяженность полков уменьшается, а их число растет. Для периода менее 0,1 пс полки исчезают, а временная зависимость концентрации электронов вырождается в гладкую кривую. С ростом периода ТГц импульса увеличивается временная протяженность и снижается число полков, которые исчезают при достижении периода 5 пс. Полученные временные зависимости концентрации генерированных электронов объясняются зависимостью скорости ударной ионизации от динамики напряженности поля в импульсе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Vicario, C. GV/m Single-cycle terahertz fields from a laser-driven large-size partitioned organic crystal / C. Vicario, B. Monoszlai, C.P. Hauri // Phys. Rev. Lett. – 2014. – V. 112, Iss. 21. – P. 213901.
2. Observation of extremely efficient terahertz generation from mid-infrared two-color laser filaments / A.D. Koulouklidis [et al.] // Nat. Commun. – 2020. – V. 11, Article number 292.

3. Highly efficient generation of GV/m-level terahertz pulses from intense femtosecond laser-foil interactions / H.-Y. Lei [et al.] // *iScience*. – 2022. – V. 25, Iss. 5. – P. 104336.
4. Generation of THz transients in FeCo/graphene nanobilayers by femtosecond laser pulses / I.V. Komisarov [et al.] // 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 29 Aug.-3 Sept. 2021. – Chengdu, China. DOI: 10.1109/IRMMW-THz50926.2021.9567468.
5. Free-carrier generation dynamics induced by ultrashort intense terahertz pulses in silicon/ A.V. Ovchinnikov [et al.] // *Optics Express*. – 2021. – V. 29, No. 16. – P. 26093-26102.
6. Silicon photonics integrated circuits: a manufacturing platform for high density, low power optical I/O's / P.P. Absil [et al.] // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23, Iss. 7. – P. 9369-9378.
7. Sze, S.M. *Physics of Semiconductor Devices* / S.M. Sze, K.K. Ng. – John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, 2007. – 832 p
8. Thornber, K.K. Applications of scaling to problems in high-field electronic transport/ K.K. Thornber // *J. Appl. Phys.* – 1981. – V. 52, Iss. 1. – P. 279-290.
9. Scharfetter, D.L. Large-signal analysis of a silicon Read diode oscillator/ D.L. Scharfetter, H.K. Gummel // *IEEE Trans. Electron Devices*. – 1969. – V.16, Iss.1. – P. 64-77.

ДИПОЛЬНЫЙ МОМЕНТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНДЕНСАТОРА С РАБОЧИМ ВЕЩЕСТВОМ «ИЗОЛЯТОР – СОБСТВЕННЫЙ ПОЛУПРОВОДНИК – ИЗОЛЯТОР»

Н. А. Поклонский, И. И. Анিকেев, С. А. Вырко

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: poklonski@bsu.by*

Предложена модель конденсатора с рабочим веществом «изолятор – собственный полупроводник – изолятор». В качестве примера рассмотрен слой собственного кристаллического кремния (*i*-Si) различной толщины, отделенный от металлических обкладок конденсатора тонкими слоями изолятора (поликристаллического алмаза). Удельный индуцированный электрический дипольный момент слоя кремния рассчитан как функция электрического напряжения на металлических обкладках для различных толщин слоя *i*-Si при температуре 300 К. Показано, что с увеличением напряжения на металлических обкладках и толщины *i*-Si величина его электрического дипольного момента монотонно увеличивается.

Ключевые слова: собственный полупроводник; нелегированный кремний; электрический дипольный момент конденсатора; трехслойная приборная структура.

DIPOLE MOMENT OF ELECTRIC CAPACITOR WITH WORKING SUBSTANCE “INSULATOR – INTRINSIC SEMICONDUCTOR – INSULATOR”

N. A. Poklonski, I. I. Anikeev, S. A. Vyrko

*Belarusian State University, Nezavisimosti Ave. 4, 220030 Minsk, Belarus
Corresponding author: N. A. Poklonski (poklonski@bsu.by)*

A model of a capacitor with the working substance “insulator – intrinsic semiconductor – insulator” is proposed. As an example, a layer of intrinsic crystalline silicon (*i*-Si) of various thicknesses, separated from the metal plates of the capacitor by thin layers of insu-